



Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA DEMANDA DE
DUCTILIDAD EN PILAS DE PUENTES COMUNES**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

Ayala Contreras Ramón Alejandro

Director de tesis: **Dra. María de la Consolación Gómez Soberón**

MÉXICO, CDMX.

Diciembre de 2016

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

Quiero agradecer profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca académica otorgada para la realización de mis estudios y tesis de maestría, además de agradecer a la Universidad Autónoma Metropolitana por las dos becas otorgadas para la asistencia y ponencia de algunos de los temas de mi tesis, en el congreso de Acapulco Guerrero en el 2015 (XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica) y Mérida Yucatán en el 2016 (XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural).

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre, Raquel Contreras Fuentes, de la cual siempre obtuve cariño, confianza, apoyo y un ejemplo para nunca rendirme y luchar por las cosas que realmente valen la pena, a mi padre, Ramón Ayala Sosa, el cual a pesar de haber muerto hace más de 14 años, me enseñó los valores de la responsabilidad, la honradez y la vocación al trabajo, a mis hermanas Meredith Jaqueline Ayala Contreras e Isela Ayala Contreras que de una u otra forma me ayudaron a cumplir esta meta en mi vida. En especial quiero agradecer a la Dra. Consuelo Gómez Soberón, profesora e investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, que con su asesoría, orientación, enseñanza y paciencia me ayudó a la concepción y realización de la presente tesis de maestría. También quiero agradecer profundamente al Dr. Hugón Juárez García, el cual puso un gran interés en la revisión de la tesis y sus consejos ayudaron a una mejor comprensión y concepción de la misma, además agradezco al Dr. José Alberto Escobar Sánchez, profesor e investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por aceptar ser revisor y parte del jurado de mi examen de grado.

En general quiero agradecer a todos y cada uno de los profesores del área de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, ya que en algún momento de mi vida he recibido alguna enseñanza de ellos, que llevaré conmigo siempre y me obligan con su ejemplo a querer superarme todos los días de mi vida, con humildad y con trabajo, de dichos profesores una mención honorífica a los profesores, Dr. Luciano Roberto Fernández Sola y Dr. Amador Terán Gilmore, los cuales siempre estuvieron dispuestos a ayudarme con algún consejo o enseñanza para la realización de mi tesis de maestría.

CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	34
1.1	<i>Resumen</i>	34
1.2	<i>Justificación</i>	35
1.3	<i>Procedimiento</i>	36
1.4	<i>Objetivos</i>	36
1.4.1	Objetivo general.....	36
1.4.2	Objetivos particulares	36
1.5	<i>Distribución de la tesis.....</i>	36
2	CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	38
2.1	<i>Variación de altura de las pilas</i>	38
2.2	<i>Número de pilas por eje</i>	39
2.3	<i>Forma de la sección transversal</i>	40
2.4	<i>Acero longitudinal.....</i>	40
2.5	<i>Acero Transversal.....</i>	41
2.6	<i>Rigidez efectiva</i>	41
2.7	<i>Efectos $P-\Delta$.....</i>	42
2.8	<i>Interacción dinámica suelo estructura (IDSE)</i>	44
2.8.1	Funciones de impedancia	45
3	CAPÍTULO 3. SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS.....	46
3.1	<i>Variación de altura de las pilas</i>	47
3.2	<i>Número de pilas por eje</i>	48
3.3	<i>Forma de la sección transversal de las pilas.....</i>	49
3.4	<i>Cuantía de acero longitudinal</i>	49
3.5	<i>Acero transversal</i>	50
3.6	<i>Rigidez efectiva</i>	50
3.7	<i>Efectos $P-\Delta$</i>	51
3.8	<i>Interacción suelo estructura</i>	51
4	CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS PUENTES.....	56
4.1	<i>Diseño de las pilas</i>	56
4.1.1	Materiales.....	56
4.1.2	Rigidez efectiva.....	57
4.1.3	Amortiguamiento	57
4.1.4	Diseño a flexo-compresión	57
4.1.5	Relación de esbeltez.....	57
4.1.6	Combinación de cargas	61
3.1.1	Selección del sismo de diseño	61
4.2	<i>Diseño de la Trabe.....</i>	62
4.3	<i>Diseño de la cimentación.....</i>	62
4.3.1	Cimentación superficial	64
4.3.1.1	Capacidad de carga	64
4.3.1.2	Asentamientos.....	68
4.3.2	Cimentación profunda.....	69
4.3.2.1	Eficiencia de los pilotes	70
4.3.2.2	Capacidad de carga	70

4.3.2.3	Asentamientos.....	72
5	CAPÍTULO 5. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL.....	76
5.1	<i>Definición de ductilidad.....</i>	76
5.1.1	Revisión por cortante.....	77
5.1.1.1	Dirección longitudinal.....	78
5.1.1.2	Dirección transversal.....	80
5.1.2	Revisión por carga axial.....	80
5.2	<i>Rotaciones calculadas para los modelos de análisis.....</i>	82
5.3	<i>Modelado de las articulaciones plásticas.....</i>	87
5.3.1	Asignación de las cargas para el análisis estático no lineal.....	87
5.3.2	Casos de carga.....	87
5.3.3	Inclusión de las articulaciones plásticas a los modelos de análisis.....	89
5.4	<i>Interacción suelo estructura.....</i>	90
5.4.1	Funciones de impedancia.....	91
5.4.2	Cálculo de las rigideces efectivas del suelo.....	92
5.4.3	Modelado de los resortes.....	95
6	CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	98
6.1	<i>Variación de altura de las pilas.....</i>	100
6.2	<i>Número de pilas por eje.....</i>	103
6.3	<i>Forma de la sección transversal.....</i>	105
6.4	<i>Cuantía de acero longitudinal.....</i>	109
6.5	<i>Acero transversal.....</i>	112
6.6	<i>Rigidez efectiva.....</i>	114
6.7	<i>Efectos $P - \Delta$.....</i>	117
6.8	<i>Interacción suelo estructura.....</i>	120
6.9	<i>Resumen de resultados (Gráficas de las ductilidades obtenidas).....</i>	125
6.9.1	Dirección longitudinal de análisis.....	125
6.9.1.1	Variación de altura de las pilas.....	125
6.9.1.2	Número de pilas por eje.....	126
6.9.1.3	Forma de la sección transversal.....	127
6.9.1.4	Cuantía de acero longitudinal.....	128
6.9.1.5	Acero transversal.....	129
6.9.1.6	Rigidez efectiva.....	130
6.9.1.7	Efectos $P - \Delta$	131
6.9.1.8	Interacción suelo estructura.....	132
6.9.2	Dirección transversal de análisis.....	133
6.10	<i>Tablas con las ductilidades obtenidas.....</i>	134
6.10.1	Dirección longitudinal de análisis.....	135
6.10.2	Dirección transversal de análisis.....	139
7	CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL.....	143
7.1	<i>Acelerogramas.....</i>	143
7.1.1	Escalado de los acelerogramas.....	145
7.2	<i>Obtención de las curvas de histéresis.....</i>	147
7.3	<i>Ductilidades obtenidas del modelo de estudio.....</i>	150
8	CONCLUSIONES.....	152
8.1	<i>Conclusiones.....</i>	153

8.2	<i>Futuras líneas de investigación</i>	154
9	REFERENCIAS	155
	APÉNDICE A. CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS	157
A.1	<i>Introducción</i>	157
A.2	<i>Curvas de capacidad de los modelos de análisis en dirección longitudinal</i>	157
A.3	<i>Curvas de capacidad de los modelos de análisis en dirección transversal</i>	226
	APÉNDICE B. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE LAS PILAS DE PUENTE	270
B.1	<i>Introducción</i>	270
B.2	<i>Diagramas de interacción de las pilas de puente en dirección longitudinal</i>	270
B.3	<i>Diagramas de interacción de las pilas de puente en dirección transversal</i>	296
	APÉNDICE C. GRÁFICAS DE LAS DUCTILIDADES OBTENIDAS	313
C.1	<i>Introducción</i>	313
C.2	<i>Gráficas de las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal de análisis</i>	313
C.3	<i>Gráficas de las ductilidades obtenidas en la dirección transversal de análisis</i>	320

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Confinamiento de estribos y refuerzo de hélice (Park y Paulay, 2009).....	41
Figura 2.2. Diferentes categorías de análisis.....	43
Figura 2.3. Gráfica de las diferentes categorías de análisis.	43
Figura 2.4. Subestructura de un puente pila-cimentación. a) Soporte empotrado b) Soporte flexible (Farantakis, Kotsoglou y Pantazopoulou 2014).....	44
Figura 3.1. Modelo de análisis para todos los casos de estudio.	46
Figura 3.2. Distribución lateral característica de un puente carretero.....	47
Figura 3.3. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 5 m y h_2 es igual a 10 m.	47
Figura 3.4. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 10 m y h_2 es igual a 20 m.	47
Figura 3.5. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 20 m y h_2 es igual a 40 m.	48
Figura 3.6. Modelos de análisis para puentes con pila única por eje.	48
Figura 3.7. Modelos de análisis para puentes con múltiples pilas por eje.	48
Figura 3.8. Forma de la sección transversal de los modelos de análisis.	49
Figura 4.1. Distribución de la deformación unitaria y deformación unitaria neta a tensión (ACI 318-05).57	
Figura 4.2. Diagrama de interacción del modelo M131 en su dirección longitudinal (ACI 318-05), a) Pila central, b) Pila extremo.	59
Figura 4.3. Diagrama de interacción del modelo M131 en su dirección transversal (ACI 318-05), a) Pila central, b) Pila extremo.	59
Figura 4.4. Espectro elástico de diseño en roca. Santa María Huatulco, CFE-2008 (Mendoza, 2014)	62
Figura 4.5. Elementos estructurales que conforman un puente típico	62
Figura 4.6. Sección transversal de la pila extremo del modelo M131 con 80V#10@12.5cm.....	63
Figura 4.7. Sistema de cimentación a base de zapatas y pilotes propuesto para los modelos de análisis con interacción suelo estructura.....	63
Figura 4.8. Diseño por capacidad de carga, nivel de aguas freáticas (Sordo Zabay, 2012).....	64
Figura 4.9. Diseño para cimentaciones cargadas excéntricamente	64
Figura 4.10. Variación de valores máximos N_c^* y N_q^* con el ángulo de fricción del suelo (Meyerhof, 1976)	71
Figura 4.11. Pendiente 2:1 a partir de 2/3 de la altura del pilote	72
Figura 4.12. Dimensiones propuestas de la pendiente 2:1 de análisis	73
Figura 5.1. Modelo de análisis para todos los casos de estudio.	77
Figura 5.2. Diagrama de interacción característico de las pilas de concreto reforzado	78
Figura 5.3. Diagrama de interacción del modelo M131 en la dirección longitudinal de análisis.	79
Figura 5.4. Diagrama de interacción del modelo M131 en la dirección transversal de análisis.	80
Figura 5.5. Modelo representativo en SAP2000	87
Figura 5.6. Carga impuesta en las direcciones longitudinal y transversal para el análisis estático no lineal. a)Px, b)Py.....	87
Figura 5.7. Asignación de la no linealidad para el caso de carga inicial para todos los modelos de análisis sin efectos $P-\Delta$	88
Figura 5.8. Asignación de la no linealidad para el caso de carga lateral para todos los modelos de análisis sin efectos $P-\Delta$	88
Figura 5.9. Articuciones plásticas asignadas a las pilas del puente en su dirección longitudinal y transversal	89
Figura 5.10. Modelado y asignación de las articulaciones plásticas a las pilas de los puentes de estudio.	90
Figura 5.11. Función de impedancia, traslacional horizontal, obtenida con el programa DYNA 6.1 para múltiples frecuencias (Valores en rad/seg y Newton).....	92
Figura 5.12. Resortes y amortiguadores equivalentes del suelo (Fernández y Avilés, 2008).....	92

Figura 5.13. Resortes del modelo de análisis M183.	96
Figura 5.14. Rigidez traslacional y rotacional del modelo de análisis con interacción suelo estructura para el modelo M183.	96
Figura 5.15. Rigidez traslacional y rotacional, modelado mediante elementos Spring del SAP2000 para el modelo M183.	97
Figura 6.1. Curva de capacidad para componentes o elementos de concreto reforzado (FEMA 356), a) Deformación y b) Relación de deformación	98
Figura 6.2. Curva de capacidad del modelo de análisis M055 mediante el software SAP2000 (línea continua) y Midas civil (línea discontinua) para: a) dirección longitudinal, b) dirección transversal.	99
Figura 6.3. Curva de capacidad del modelo de análisis M054 en su dirección longitudinal mediante el software SAP2000, Midas civil, a mano con rigidez axial infinita y a mano con viga rígida.	99
Figura 6.4. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea continua) y M132 (línea discontinua) en la dirección longitudinal	100
Figura 6.5. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 en la dirección longitudinal	101
Figura 6.6. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132 en la dirección longitudinal	101
Figura 6.7. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea continua) y M132 (línea discontinua) en la dirección transversal	102
Figura 6.8. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 en la dirección transversal	102
Figura 6.9. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132 en la dirección transversal.	102
Figura 6.10. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea discontinua) y M137 (línea continua) en la dirección longitudinal.....	103
Figura 6.11. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (pila única) en la dirección longitudinal.....	103
Figura 6.12. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M137 (múltiples pilas) en la dirección longitudinal.....	104
Figura 6.13. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea discontinua) y M137 (línea continua) en la dirección transversal.....	104
Figura 6.14. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (pila única) en la dirección transversal.....	105
Figura 6.15. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M137 (múltiples pilas) en la dirección transversal.....	105
Figura 6.16. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea discontinua), M134 (línea punteada) y M139 (línea continua), en la dirección longitudinal.	106
Figura 6.17. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 (sección tipo muro) en la dirección longitudinal.	106
Figura 6.18. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (sección oblonga maciza) en la dirección longitudinal.....	106
Figura 6.19. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M139 (sección circular hueca) en la dirección longitudinal.	107
Figura 6.20. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M139 (línea continua), M131 (línea discontinua) y M134 (línea punteada) en la dirección transversal.....	108
Figura 6.21. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 (sección tipo muro) en la dirección transversal	109
Figura 6.22. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (sección oblonga maciza) en la dirección transversal.....	109
Figura 6.23. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M139 (sección circular hueca) en la dirección transversal	109

Figura 6.24. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M121 (línea continua), M134 (línea discontinua) y M147 (línea punteada) en la dirección longitudinal.....	110
Figura 6.25. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M121 (sobre refuerzo) en la dirección longitudinal.....	110
Figura 6.26. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (buen refuerzo) en la dirección longitudinal.....	110
Figura 6.27. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M147 (escaso refuerzo) en la dirección longitudinal.....	111
Figura 6.28. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M121 (línea continua), M134 (línea discontinua) M147 (línea punteada) en la dirección transversal.....	112
Figura 6.29. Curva de capacidad de los modelos de estudio en la dirección longitudinal M134 (Buen confinamiento transversal, y M095 (Escaso confinamiento transversal).....	113
Figura 6.30. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (buen confinamiento transversal) en la dirección longitudinal.....	113
Figura 6.31. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M095 (escaso confinamiento transversal) en la dirección longitudinal.	113
Figura 6.32. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M056 (línea continua), M134 (línea discontinua) en la dirección longitudinal.	115
Figura 6.33. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056 (Sección no agrietada) en la dirección longitudinal.....	115
Figura 6.34. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (Sección agrietada) en la dirección longitudinal.	115
Figura 6.35. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M056 (línea continua), M134 (línea discontinua) en la dirección transversal.	116
Figura 6.36. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056 (Sección no agrietada) en la dirección transversal.....	117
Figura 6.37. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (Sección agrietada) en la dirección transversal.	117
Figura 6.38. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea continua), M160 (línea discontinua) en la dirección longitudinal.	118
Figura 6.39. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (Sin efectos $P - \Delta$) en la dirección longitudinal.	118
Figura 6.40. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M160 (Con efectos $P - \Delta$) en la dirección longitudinal.....	118
Figura 6.41. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea continua), M160 (línea discontinua) en la dirección transversal.	119
Figura 6.42. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (Sin efectos $P - \Delta$) en la dirección transversal.	119
Figura 6.43. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M160 (Con efectos $P - \Delta$) en la dirección transversal.....	120
Figura 6.44. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M173 (línea discontinua), M186 (línea discontinua y puntos,) M199 (línea con puntos) y M134 (línea continua) en la dirección longitudinal. .	120
Figura 6.45. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173 (Suelo blando) en la dirección longitudinal.	121
Figura 6.46. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186 (Suelo intermedio) en la dirección longitudinal.	121
Figura 6.47. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199 (Suelo duro) en la dirección longitudinal.	121
Figura 6.48. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (base empotrada) en la dirección longitudinal.....	122

Figura 6.49. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M173 (línea discontinua), M186 (línea discontinua y puntos,) M199 (línea con puntos) y M134 (línea continua) en la dirección transversal. ...	123
Figura 6.50. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173 (Suelo blando) en la dirección transversal.	123
Figura 6.51. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186 (Suelo intermedio) en la dirección transversal.	123
Figura 6.52. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199 (Suelo duro) en la dirección transversal.	124
Figura 6.53. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (base empotrada) en la dirección transversal.	124
Figura 6.54. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de diferentes alturas de las pilas de puente, en la dirección longitudinal de análisis.	125
Figura 6.55. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de número de pilas por eje, para pilas cortas, en la dirección longitudinal de análisis.	126
Figura 6.56. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de número de pilas por eje, para pilas altas, en la dirección longitudinal de análisis.	127
Figura 6.57. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la forma de la sección transversal, en la dirección longitudinal de análisis.	128
Figura 6.58. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero longitudinal, en la dirección longitudinal de análisis.	129
Figura 6.59. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero transversal, en la dirección longitudinal de análisis.	130
Figura 6.60. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la rigidez efectiva de los elementos estructurales, en la dirección longitudinal de análisis.	130
Figura 6.61. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro los efectos $P-\Delta$, en la dirección longitudinal de análisis.	131
Figura 6.62. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro la interacción suelo estructura, en la dirección longitudinal de análisis.	132
Figura 6.63. Ductilidades obtenidas, para representar las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal y transversal de análisis.	133
Figura 6.64. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero transversal, en la dirección transversal de análisis.	134
Figura 7.1. Acelerograma del sismo de Guerrero en 1979	143
Figura 7.2. Acelerograma del sismo de Michoacán en 1985	144
Figura 7.3. Acelerograma del sismo de Colima en 1986	144
Figura 7.4. Acelerograma del sismo de Colima en 1995	144
Figura 7.5. Acelerograma del sismo de Oaxaca en 1999	145
Figura 7.6. Espectros de respuesta de los sismos de análisis.	145
Figura 7.7. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Guerrero 1979 (línea punteada) con un factor de escala de 5.5	145
Figura 7.8. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Michoacán 1985 (línea punteada) con un factor de escala de 0.55	146
Figura 7.9. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Colima 1986 (línea punteada) con un factor de escala de 1.2	146
Figura 7.10. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Colima 1995 (línea punteada) con un factor de escala de 0.25	146
Figura 7.11. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Oaxaca 1999 (línea punteada) con un factor de escala de 3.5	147
Figura 7.12. Modelo de estudio, en el programa de análisis estructural, Ruaumoko 3D.	147
Figura 7.13. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Guerrero 1979.	148
Figura 7.14. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Michoacán 1985.	148

[illegible]

[illegible]

Figura A.3.117. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M187	265
Figura A.3.118. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M188	265
Figura A.3.119. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M189	266
Figura A.3.120. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M190	266
Figura A.3.121. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M196	266
Figura A.3.122. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M197	267
Figura A.3.123. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M198	267
Figura A.3.124. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199	267
Figura A.3.125. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M200	268
Figura A.3.126. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M201	268
Figura A.3.127. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M202	268
Figura A.3.128. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M203	269
Figura B.2.1. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M118 y M079 para: a) pila central y b) pila extremo	270
Figura B.2.2. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M119 y M080 para: a) pila central y b) pila extremo	270
Figura B.2.3. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M120 y M081 para: a) pila central y b) pila extremo	271
Figura B.2.4. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M131, M092, M157, M170, M183 y M196 para: a) pila central y b) pila extremo	271
Figura B.2.5. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M132, M093, M158, M171, M184 y M197 para: a) pila central y b) pila extremo	271
Figura B.2.6. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M133, M094, M159, M172, M185 y M198 para: a) pila central y b) pila extremo	272
Figura B.2.7. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M144 y M092 para: a) pila central y b) pila extremo	272
Figura B.2.8. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M145 y M093 para: a) pila central y b) pila extremo	272
Figura B.2.9. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M146 y M094 para: a) pila central y b) pila extremo	273
Figura B.2.10. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M121 y M082 para: a) pila central y b) pila extremo	273
Figura B.2.11. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M122 y M083 para: a) pila central y b) pila extremo	273
Figura B.2.12. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M123 y M084 para: a) pila central y b) pila extremo	274
Figura B.2.13. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M124 y M085 para: a) pila central y b) pila extremo	274

Figura B.2.14. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M125 y M086 para: a) pila central y b) pila extremo	274
Figura B.2.15. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M134, M095, M160, M173, M186 y M199 para: a) pila central y b) pila extremo	275
Figura B.2.16. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M135, M096, M161, M174, M187 y M174 para: a) pila central y b) pila extremo	275
Figura B.2.17. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M136, M097, M162, M175, M188 y M175 para: a) pila central y b) pila extremo	275
Figura B.2.18. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M137, M098, M163, M176, M189 y M202 para: a) pila central y b) pila extremo	276
Figura B.2.19. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M138, M099, M164, M177, M190 y M203 para: a) pila central y b) pila extremo	276
Figura B.2.20. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M147 y M108 para: a) pila central y b) pila extremo	276
Figura B.2.21. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M148 y M109 para: a) pila central y b) pila extremo	277
Figura B.2.22. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M149 y M110 para: a) pila central y b) pila extremo	277
Figura B.2.23. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M150 y M111 para: a) pila central y b) pila extremo	277
Figura B.2.24. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M151 y M112 para: a) pila central y b) pila extremo	278
Figura B.2.25. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M126 y M087 para: a) pila central y b) pila extremo	278
Figura B.2.26. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M127 y M088 para: a) pila central y b) pila extremo	278
Figura B.2.27. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M128 y M089 para: a) pila central y b) pila extremo	279
Figura B.2.28. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M129 y M090 para: a) pila central y b) pila extremo	279
Figura B.2.29. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M130 y M091 para: a) pila central y b) pila extremo	279
Figura B.2.30. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M139, M100, M165, M178, M191 y M204 para: a) pila central y b) pila extremo	280
Figura B.2.31. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M140, M101, M166, M179, M192 y M205 para: a) pila central y b) pila extremo	280
Figura B.2.32. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M141, M102, M167, M180, M193 y M206 para: a) pila central y b) pila extremo	280
Figura B.2.33. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M142, M103, M168, M181, M194 y M207 para: a) pila central y b) pila extremo	281
Figura B.2.34. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M143, M104, M169, M182, M195 y M208 para: a) pila central y b) pila extremo	281
Figura B.2.35. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M152 y M113 para: a) pila central y b) pila extremo	281
Figura B.2.36. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M153 y M114 para: a) pila central y b) pila extremo	282
Figura B.2.37. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M154 y M115 para: a) pila central y b) pila extremo	282
Figura B.2.38. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M155 y M116 para: a) pila central y b) pila extremo	282

Figura B.2.39. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M156 y M117 para: a) pila central y b) pila extremo	283
Figura B.2.40. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M040 y M001 para: a) pila central y b) pila extremo	283
Figura B.2.41. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M041 y M002 para: a) pila central y b) pila extremo	283
Figura B.2.42. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M042 y M003 para: a) pila central y b) pila extremo	284
Figura B.2.43. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M053 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo	284
Figura B.2.44. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M054 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo	284
Figura B.2.45. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M055 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo	285
Figura B.2.46. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M066 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo	285
Figura B.2.47. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M067 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo	285
Figura B.2.48. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M068 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo	286
Figura B.2.49. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M043 y M004 para: a) pila central y b) pila extremo	286
Figura B.2.50. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M044 y M005 para: a) pila central y b) pila extremo	286
Figura B.2.51. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M045 y M006 para: a) pila central y b) pila extremo	287
Figura B.2.52. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M046 y M007 para: a) pila central y b) pila extremo	287
Figura B.2.53. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M047 y M008 para: a) pila central y b) pila extremo	287
Figura B.2.54. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M056 y M017 para: a) pila central y b) pila extremo	288
Figura B.2.55. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M057 y M018 para: a) pila central y b) pila extremo	288
Figura B.2.56. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M058 y M019 para: a) pila central y b) pila extremo	288
Figura B.2.57. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M059 y M020 para: a) pila central y b) pila extremo	289
Figura B.2.58. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M060 y M021 para: a) pila central y b) pila extremo	289
Figura B.2.59. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M069 y M030 para: a) pila central y b) pila extremo	289
Figura B.2.60. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M070 y M031 para: a) pila central y b) pila extremo	290
Figura B.2.61. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M071 y M032 para: a) pila central y b) pila extremo	290
Figura B.2.62. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M072 y M033 para: a) pila central y b) pila extremo	290
Figura B.2.63. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M073 y M034 para: a) pila central y b) pila extremo	291

Figura B.2.64. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M048 y M009 para: a) pila central y b) pila extremo	291
Figura B.2.65. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M049 y M010 para: a) pila central y b) pila extremo	291
Figura B.2.66. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M050 y M011 para: a) pila central y b) pila extremo	292
Figura B.2.67. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M051 y M012 para: a) pila central y b) pila extremo	292
Figura B.2.68. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M052 y M013 para: a) pila central y b) pila extremo	292
Figura B.2.69. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M061 y M022 para: a) pila central y b) pila extremo	293
Figura B.2.70. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M062 y M023 para: a) pila central y b) pila extremo	293
Figura B.2.71. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M063 y M024 para: a) pila central y b) pila extremo	293
Figura B.2.71. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M064 y M025 para: a) pila central y b) pila extremo	294
Figura B.2.72. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M065 y M026 para: a) pila central y b) pila extremo	294
Figura B.2.74. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M074 y M035 para: a) pila central y b) pila extremo	294
Figura B.2.74. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M075 y M036 para: a) pila central y b) pila extremo	295
Figura B.2.75. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M076 y M037 para: a) pila central y b) pila extremo	295
Figura B.2.76. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M077 y M038 para: a) pila central y b) pila extremo	295
Figura B.2.77. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M078 y M039 para: a) pila central y b) pila extremo	296
Figura B.3.1. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M118 y M079 para: a) pila central y b) pila extremo	296
Figura B.3.2. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M119 y M080 para: a) pila central y b) pila extremo	296
Figura B.3.3. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M120 y M081 para: a) pila central y b) pila extremo	297
Figura B.3.4. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M131, M092, M157, M170, M183 y M196 para: a) pila central y b) pila extremo	297
Figura B.3.5. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M132, M093, M158, M171, M184 y M197 para: a) pila central y b) pila extremo	297
Figura B.3.6. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M133, M094, M159, M172, M185 y M198 para: a) pila central y b) pila extremo	298
Figura B.3.7. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M144 y M092 para: a) pila central y b) pila extremo	298
Figura B.3.8. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M145 y M093 para: a) pila central y b) pila extremo	298
Figura B.3.9. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M146 y M094 para: a) pila central y b) pila extremo	299
Figura B.3.10. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M121 y M082 para: a) pila central y b) pila extremo	299

Figura B.3.11. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M122 y M083 para: a) pila central y b) pila extremo	299
Figura B.3.12. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M123 y M084 para: a) pila central y b) pila extremo	300
Figura B.3.13. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M124 y M085 para: a) pila central y b) pila extremo	300
Figura B.3.14. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M125 y M086 para: a) pila central y b) pila extremo	300
Figura B.3.15. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M134, M095, M160, M173, M186 y M199 para: a) pila central y b) pila extremo	301
Figura B.3.16. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M135, M096, M161, M174, M187 y M174 para: a) pila central y b) pila extremo	301
Figura B.3.17. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M136, M097, M162, M175, M188 y M175 para: a) pila central y b) pila extremo	301
Figura B.3.18. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M137, M098, M163, M176, M189 y M202 para: a) pila central y b) pila extremo	302
Figura B.3.19. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M138, M099, M164, M177, M190 y M203 para: a) pila central y b) pila extremo	302
Figura B.3.20. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M147 y M108 para: a) pila central y b) pila extremo	302
Figura B.3.21. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M148 y M109 para: a) pila central y b) pila extremo	303
Figura B.3.22. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M149 y M110 para: a) pila central y b) pila extremo	303
Figura B.3.23. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M150 y M111 para: a) pila central y b) pila extremo	303
Figura B.3.24. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M151 y M112 para: a) pila central y b) pila extremo	304
Figura B.3.25. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M040 y M001 para: a) pila central y b) pila extremo	304
Figura B.3.26. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M041 y M002 para: a) pila central y b) pila extremo	304
Figura B.3.27. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M042 y M003 para: a) pila central y b) pila extremo	305
Figura B.3.28. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M053 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo	305
Figura B.3.29. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M054 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo	305
Figura B.3.30. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M055 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo	306
Figura B.3.31. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M066 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo	306
Figura B.3.32. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M067 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo	306
Figura B.3.33. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M068 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo	307
Figura B.3.34. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M043 y M004 para: a) pila central y b) pila extremo	307
Figura B.3.35. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M044 y M005 para: a) pila central y b) pila extremo	307

Figura B.3.36. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M045 y M006 para: a) pila central y b) pila extremo	308
Figura B.3.37. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M046 y M007 para: a) pila central y b) pila extremo	308
Figura B.3.38. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M047 y M008 para: a) pila central y b) pila extremo	308
Figura B.3.39. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M056 y M017 para: a) pila central y b) pila extremo	309
Figura B.3.40. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M057 y M018 para: a) pila central y b) pila extremo	309
Figura B.3.41. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M058 y M019 para: a) pila central y b) pila extremo	309
Figura B.3.42. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M059 y M020 para: a) pila central y b) pila extremo	310
Figura B.3.43. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M060 y M021 para: a) pila central y b) pila extremo	310
Figura B.3.44. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M069 y M030 para: a) pila central y b) pila extremo	310
Figura B.3.45. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M070 y M031 para: a) pila central y b) pila extremo	311
Figura B.3.46. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M071 y M032 para: a) pila central y b) pila extremo	311
Figura B.3.47. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M072 y M033 para: a) pila central y b) pila extremo	311
Figura B.3.48. Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M073 y M034 para: a) pila central y b) pila extremo	312
Figura C.2.1. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5 m de altura y pila central con 10 m), buen confinamiento transversal y pilas únicas por eje.....	313
Figura C.2.2. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10 m y pila central con 20 m), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.....	313
Figura C.2.3. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.	314
Figura C.2.4. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.....	314
Figura C.2.5. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.....	314
Figura C.2.6. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.	315
Figura C.2.7. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.	315
Figura C.2.8. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.	315
Figura C.2.9. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.....	316
Figura C.2.10. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.....	316
Figura C.2.11. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.	316
Figura C.2.12. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.	317

Figura C.3.18. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.	325
Figura C.3.19. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.....	326
Figura C.3.20. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.....	326

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen Variación entre alturas (Mendoza, 2014).....	38
Tabla 2.2. Ductilidad en pilas (Caltrans 2010)	39
Tabla 2.3. Ductilidad en pilas (AASHTO LRFD 2009)	39
Tabla 2.4. Ductilidad en pilas (CFE 2008)	39
Tabla 2.5. Ductilidad en pilas (AASHTO standard 2002).....	39
Tabla 2.6. Ductilidad en pilas (AASHTO LRFD 2010)	40
Tabla 2.7. Ductilidad en pilas (SCT 2005).....	40
Tabla 2.8. Rigidez efectiva (FEMA 356).....	42
Tabla 3.1. Nivel de desempeño para columnas de concreto reforzado FEMA 356	50
Tabla 3.2. Propiedades del suelo.....	51
Tabla 3.3. Modelos de análisis y parámetros impuestos.....	52
Tabla 4.1. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo blando	74
Tabla 4.2. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo intermedio.....	75
Tabla 4.3. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo duro	75
Tabla 5.2. Nivel de desempeño para columnas de concreto reforzado FEMA 356 del modelo M131. Para un buen y mal o nulo confinamiento transversal	82
Tabla 5.3. Rotaciones calculadas para los modelos de análisis, propuestos por el FEMA 356.....	83
Tabla 5.4. Periodos de los modelos de análisis en base empotrada	91
Tabla 6.1. Ductilidades para los modelos de análisis en la dirección longitudinal (Distinta altura).....	101
Tabla 6.2. Ductilidades para los modelos de análisis en la dirección transversal (Distinta altura).	103
Tabla 6.3. Ductilidades obtenidas para los modelos con pilas únicas y múltiples pilas por eje, en la dirección longitudinal.	104
Tabla 6.4. Ductilidades obtenidas para los modelos con pilas únicas y múltiples pilas por eje, en la dirección transversal.	105
Tabla 6.5. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta forma de sección transversal en la dirección longitudinal.	107
Tabla 6.6. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta forma de sección transversal en la dirección transversal.	109
Tabla 6.7. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta cuantía de acero longitudinal en la dirección longitudinal.	111
Tabla 6.8. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta cuantía de acero longitudinal en la dirección transversal.	112
Tabla 6.9. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinto confinamiento de acero transversal en la dirección longitudinal de análisis.....	114
Tabla 6.10. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinto confinamiento de acero transversal en la dirección transversal de análisis.....	114
Tabla 6.11. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta rigidez efectiva en la dirección longitudinal de análisis.	116
Tabla 6.12. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta rigidez efectiva en la dirección transversal de análisis.	117
Tabla 6.13. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la dirección longitudinal de análisis.	119
Tabla 6.14. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la dirección transversal de análisis.	120
Tabla 6.15. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura en la dirección longitudinal de análisis.....	122

Tabla 6.16. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura en la dirección transversal de análisis.....	124
Tabla 6.17. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la altura de las pilas, en la dirección longitudinal de análisis.	125
Tabla 6.18. Ductilidades obtenidas para observar la influencia del número de pilas por eje, para pilas cortas, en la dirección longitudinal de análisis.	126
Tabla 6.19. Ductilidades obtenidas para observar la influencia del número de pilas por eje, para pilas altas, en la dirección longitudinal de análisis.....	127
Tabla 6.20. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la forma de la sección transversal, en la dirección longitudinal de análisis.....	127
Tabla 6.21. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero longitudinal, en la dirección longitudinal de análisis.....	128
Tabla 6.22. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero transversal, en la dirección longitudinal de análisis.....	129
Tabla 6.23. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la rigidez efectiva de los elementos estructurales, en la dirección longitudinal de análisis.	130
Tabla 6.24. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos P- Δ , en la dirección longitudinal de análisis.	131
Tabla 6.25. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura, en la dirección longitudinal de análisis.....	132
Tabla 6.26. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal y transversal de análisis.	133
Tabla 6.27. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero transversal, en la dirección transversal de análisis.....	134
Tabla 6.28. Ductilidades y desplazamientos de los modelos de análisis, para todos los parámetros de estudio, en la dirección longitudinal de análisis.....	135
Tabla 6.28. Ductilidades y desplazamientos de los modelos de análisis, para todos los parámetros de estudio, en la dirección transversal de análisis.	139
Tabla 7.1. Sismos de análisis	143
Tabla 7.2. Factores de escala	147
Tabla 7.3. Periodos fundamentales obtenidos con SAP200 y Ruaumoko 3D, del modelo M209.	148
Tabla 7.4. Desplazamientos y ductilidades en la dirección longitudinal y transversal de análisis, por medio de un análisis paso a paso en el tiempo para el modelo M209.....	150
Tabla 7.5. Ductilidades en la dirección longitudinal y transversal de análisis, por medio de un análisis estático no lineal (M140) y un análisis paso a paso en el tiempo (M209)	151

1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

En el presente trabajo de investigación, se abordaron diferentes parámetros que pueden llegar a afectar la ductilidad de pilas de puentes carreteros comunes de concreto reforzado, esto debido a que los distintos reglamentos de diseño de puentes, manejan factores de ductilidad que muchas veces son muy generales o que manejan escasa información de los múltiples tipos de puentes carreteros que existen en la actualidad, por lo que se vuelve relevante, desarrollar estudios sobre las distintas variantes que pueden llegar a afectar dicha ductilidad en pilas de puente, por tal razón se propusieron algunos parámetros que pueden dar una mejor idea de los factores de ductilidad a utilizar por los diseñadores o estructuristas en el diseño de pilas de puentes. Además debido a que gran parte de los estudios sobre el tema se han centrado en el comportamiento de columnas de edificios, es necesario el comprobar si realmente los coeficientes máximos de ductilidad recomendados en códigos como el AASHTO, CFE y Caltrans, cubren diferentes variantes significativas.

En total se analizaron 209 modelos, en donde se obtuvieron factores de ductilidad para un límite de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, bajo los distintos parámetros propuestos en esta investigación, donde a un total de 208 modelos se les realizó un análisis estático no lineal, y solo a un modelo se le hizo un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo, este último solo y exclusivamente a manera de comprobación de resultados.

Los parámetros que afectan la ductilidad en pilas de puente carreteros comunes propuestos en este trabajo de investigación, para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso son:

1. *Variación de alturas entre pilas.* se analizaron algunas variaciones de altura de pilas, entre 5 y 40 m. Esto quiere decir que se analizaron puentes con alturas de pilas de 5, 10, 20 y 40m donde las pilas de los extremos son 0.5 veces la altura de la pila central.
2. *Número de pilas por eje.* Los distintos reglamentos (AASHTO, CFE, Caltrans) manejan factores de ductilidad para pilas únicas y para múltiples pilas por eje, en esta investigación tal condición se expresa por medio de una pila por eje (pila única) y tres pilas por eje (múltiples pilas).
3. *Forma de la sección transversal de pilas de puente.* En el presente trabajo se incluirán secciones tipo muro, oblonga maciza, y circular hueca.
4. *Cuantía de refuerzo longitudinal.* Se toma en cuenta este parámetro para considerar las posibilidades de malos diseños u obsoletos en puentes viejos, por lo que se considerará una cuantía cualitativa del acero longitudinal, como: mal diseño, buen diseño y sobre reforzado. A partir de esta clasificación cualitativa se proponen porcentajes de acero con los que se diseñaran los elementos estructurales.
5. *Refuerzo transversal.* Conforme a los lineamientos de FEMA, se consideran elementos con detallado adecuado (buen confinamiento transversal) y no adecuado (escaso o nulo confinamiento transversal).
6. *Rigidez efectiva.* Se agrietara la sección de los elementos estructurales conforme a norma (FEMA) y también no se agrietara la sección de los elementos, para observar la influencia de la rigidez efectiva en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente.
7. *Efectos $P-\Delta$* Para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes comunes, se incluirán algunos modelos con dichos efectos.

8. *Interacción suelo estructura.* Se tomarán en cuenta tres tipos de suelos: blando, roca y algo intermedio, para verificar la influencia de la flexibilidad del suelo en la respuesta del puente.

El diseño de los elementos estructurales que componen a los puentes de estudio, se realizó conforme a norma, esto quiere decir que los elementos estructurales, tales como las pilas de puente, se diseñaron bajo las consideraciones que marcan los códigos de diseño, para todos los casos de estudio de esta investigación.

Enseguida mediante el diseño de las articulaciones plásticas, realizando una revisión por carga axial, por cortante, y por grado de confinamiento transversal, se le asignaron las rotaciones a los distintos modelos de estudio por medio de las rotaciones que recomienda el FEMA 356 para columnas de concreto reforzado y estableciendo así, el nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso a la curva de capacidad obtenida para todos los casos de análisis, por medio de un análisis estático no lineal en el software de análisis estructural SAP2000, para posteriormente obtener la ductilidad con una relación del desplazamiento último entre el desplazamiento a la primer fluencia, bajo los distintos parámetros propuestos en la presente investigación.

La viga cajón propuesta en todos los modelos de análisis no se articulara inelásticamente, debido a que se ha verificado que el comportamiento de este elemento es elástico (esto porque normalmente su diseño está regido por carga viva). Entonces, solo las pilas desarrollaran comportamiento no lineal para los modelos propuestos en esta investigación.

Anexo a esta investigación a uno de los modelos de estudio, se le realizó un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo, a manera de comprobación de las ductilidades obtenidas (Modelo M209), en donde por medio de la curva de histéresis obtenida del software de análisis estructural (Ruaumoko 3D) para cinco diferentes sismos, se obtuvo la ductilidad del modelo de análisis.

1.2 Justificación

En muchos de los códigos de diseño de puentes actuales, existe escasa información de los valores de ductilidad propuestos para pilas de puente, por lo que es de suma importancia el realizar estudios paramétricos de todos aquellos factores que pueden llegar a afectar la ductilidad de dichas pilas de puente. La escasa información y la discrepancia de algunos valores de ductilidad propuestos por los códigos de diseño, genera que los diseñadores de puentes o estructuristas, tengan poca información sobre que niveles de ductilidad pueden alcanzar dichos elementos estructurales, lo cual puede desembocar en diseños inadecuados.

Anteriormente a este trabajo de investigación, Mendoza en el 2014 realizó un estudio paramétrico de la demanda de ductilidad en pilas de puentes comunes a seis modelos de análisis, cuyos principales parámetros a analizar fueron las distintas variaciones de altura entre pilas (5, 10, 20 y 40 m) y distintas geometrías en la sección transversal de las pilas (rectangular hueca, circular hueca y circular maciza), por medio de análisis estáticos no lineales y paso a paso en el tiempo. Aunque Mendoza determinó algunos resultados, existen múltiples factores que pueden afectar la demanda de ductilidad en pilas. Debido a esto en la presente investigación se extiende el entendimiento, con la propuesta de nuevos parámetros que pueden llegar a influir en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente.

1.3 Procedimiento

Para el estudio paramétrico propuesto se considera el siguiente procedimiento:

- Se verificará el diseño de una superestructura común, para evaluar las cargas que ésta transmite a las pilas.
- Las pilas de cada modelo de puente se diseñaran conforme a reglamento (ACI 318-05) para definir los armados longitudinales.
- Mediante un análisis estático no lineal (Pushover) y considerando los diferentes parámetros planteados, se buscara por medio del programa de análisis estructural SAP 2000 obtener las curvas de capacidad utilizando la metodología del FEMA 356. Por medio de estas curvas y los límites de desempeño de seguridad de vida y prevención de colapso, se obtendrán las ductilidades de las pilas de los puentes en estudio. Estos valores se compararán con aquellos sugeridos en los códigos de diseño de aplicación en México (AASHTO, CFE), para verificar si los valores de ductilidad son realmente fiables, bajo diferentes parámetros que pueden afectar dicha ductilidad.
- Mediante un análisis dinámico no lineal se buscará, de igual manera, observar las variaciones en la demanda de ductilidad de las pilas, para verificar si la ductilidad empleada en los diferentes códigos son desarrolladas a carga sísmica. Dicho análisis se realizara utilizando el programa de análisis de estructuras Ruaumoko 3D.
- Con los análisis estático no lineal y dinámico no lineal se observará si realmente los valores de ductilidad que plantean los distintos códigos de diseño, son óptimos bajo diferentes parámetros que pueden afectar dicha ductilidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de diferentes parámetros que afectan la ductilidad de pilas de puentes carreteros comunes, mediante análisis no lineales, estáticos y dinámicos, a carga sísmica. Los parámetros a considerar son la variación de altura entre pilas, el número de pilas por eje, la forma de la sección transversal de pilas de puente, la cuantía de acero longitudinal y transversal, la rigidez efectiva de los elementos estructurales, los efectos $P-\Delta$ y la interacción suelo estructura para diferentes tipos de suelo.

1.4.2 Objetivos particulares

Entre los objetivos particulares que se buscan con este trabajo están:

- Determinar curvas de capacidad para cada tipo de puente analizado.
- Verificar si las variaciones de los parámetros de análisis están considerados en los valores de capacidad de ductilidad de puentes comunes que recomiendan los diversos códigos de diseño.
- Obtener factores de ductilidad de algún modelo de estudio, mediante un análisis paso a paso en el tiempo, para comprobación de resultados.
- Plantear algunas recomendaciones para valores de ductilidad de puentes.
- Proponer líneas de investigación futuras.

1.5 Distribución de la tesis

El trabajo de tesis se distribuye en ocho capítulos, donde en los primeros capítulos, se describen los estudios previos además de establecer un marco teórico del trabajo. Los últimos capítulos indican la metodología desarrollada, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo. De manera específica, los capítulos del trabajo comprenden:

- Capítulo 1: Se presenta la introducción, metodología y objetivos a seguir durante este trabajo, así como un pequeño resumen y la justificación de la importancia de realizar estudios paramétricos en este tipo de estructuras, muy importantes ante la sociedad pero de poco estudio experimental y analítico.
- Capítulo 2: Se define un marco teórico con los antecedentes que tienen implicaciones directas, con el presente trabajo de investigación, además de presentar las diferentes ductilidades que manejan los principales códigos de diseño que se utilizan en México (AASHTO, CFE, Caltrans y SCT).
- Capítulo 3: Se da una explicación detallada de la selección de los modelos de análisis para todos los parámetros que se proponen en esta investigación, esto quiere decir se muestran todos los modelos de estudio que se utilizaron para la concepción de esta tesis.
- Capítulo 4: Al ser una investigación paramétrica de las diferentes causas que afectan la ductilidad en las pilas de puentes comunes, es de suma importancia el establecer las teorías y los diseños, que se emplearon en la realización de este trabajo.
- Capítulo 5: Se presenta el modelado, y el diseño de las articulaciones plásticas conforme al FEMA 356 (revisión por cortante, por nivel de confinamiento transversal y por carga axial), también se indican los cálculos realizados para obtener la curva de capacidad mediante un análisis estático no lineal, además de los cálculos realizados para el modelado no lineal con interacción suelo estructura de los distintos modelos propuestos en esta investigación.
- Capítulo 6: Se muestra el análisis de resultados, para todos los parámetros de estudio propuestos, por medio de las curvas de capacidad y graficar las ductilidades obtenidas, de modelos representativos para cada caso de estudio, en la dirección longitudinal y transversal de análisis.
- Capítulo 7: Se muestra una comprobación de resultados de algún modelo de estudio, por medio de un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo a carga sísmica.
- Capítulo 8: Se indican las conclusiones del trabajo de investigación con los puntos de mayor relevancia de los distintos parámetros de estudio propuestos, además de algunas propuestas para investigaciones futuras.

2 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Los aspectos fundamentales que influyen en la ductilidad que desarrollan los elementos estructurales de sistemas sometidos a sismo, es un tema muy extenso, ya que de esto dependerá la correcta estimación de la capacidad de deformación que desarrollara la estructura en su conjunto. Lo que se presenta a continuación son algunos de los parámetros utilizados en esta investigación para observar las repercusiones en ductilidad en pilas de puentes carreteros comunes. Esto quiere decir que se podrá observar si realmente los parámetros propuestos en esta investigación tienen una repercusión en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes.

2.1 Variación de altura de las pilas

Mediante análisis estáticos y dinámicos inelásticos, Mendoza (2014) estudió la variación de la ductilidad de pilas de puentes con diferente altura y número de pilas por eje. En su trabajo, Mendoza demostró que para todas las pilas se obtuvieron ductilidades similares a los valores que propone CFE 2008 en su capítulo de puentes. Estos valores también son menores a los que propone Caltrans (2010) como ductilidades máximas, pero en algunos casos superan los valores máximos sugeridos por AASHTO standard (2002) y LRFD (2009 y 2010). Para la tipología de puentes estudiados, la variación de las alturas de las pilas sí contribuye para la capacidad de ductilidad de los elementos estructurales. Los modelos de sección rectangular, con iguales características pero con el doble de altura de pilas tienen mayor ductilidad transversal y menos ductilidad longitudinal.

En cuanto al número de pilas por eje, Mendoza indica que los modelos con iguales características pero que difieren en el número de pilas por eje (modelo con tres pilas por eje, comparado con modelo con pila única por eje) tienen variaciones en las ductilidades de pilas. El modelo con tres pilas por eje (M-03) presenta mayor ductilidad transversal y menor ductilidad longitudinal, aunque en general es el que tiene mayor ductilidad.

En la tabla 2.1 se muestra los modelos utilizados por Mendoza (2014) para las diferentes variantes con las que se obtuvieron las ductilidades de estudio.

Tabla 2.1. Resumen Variación entre alturas (Mendoza, 2014)

Modelo	Tipo de sección	h_1 (m)	h_2 (m)	%Acero	Pilas por eje
M-01	Rectangular hueca	10	20	1.62%	1
M-02	Rectangular hueca	20	40	1.41%	1
M-03	Circular maciza	5	10	2.18%	3
M-04	Circular maciza	10	20	1.56%	2
M-05	Circular hueca	10	20	3.15%	2
M-06	Circular maciza	5	10	2.46%	1
h_1 = altura de pila eje extremo, m.					
h_2 = altura de pila eje central, m					

Debido a lo anterior, es de suma importancia realizar investigaciones, tanto analíticas como experimentales, de todos aquellos parámetros que pueden influir en la demanda de ductilidad de pilas de puentes comunes y especiales, ya que al realizar más investigaciones se llegara a un mejor entendimiento de los parámetros que tienen una alta influencia en la capacidad de ductilidad que generan estos elementos estructurales y por lo tanto los códigos de diseño tendrán una mejor valoración en el diseño de puentes.

2.2 Número de pilas por eje

Los distintos códigos de diseño manejan factores de ductilidad expresado mediante pilas únicas y múltiples pilas (Caltrans 2010, AASHTO LRFD 2009, CFE 2008, AASHTO standard 2002, AASHTO LRFD 2010 y SCT 2005) por citar algunos, representados por las tablas 2.2 a 2.7 respectivamente. En las tablas antes mencionadas se puede observar la diferencia de ductilidades que manejan los códigos de diseño conforme a la cantidad de pilas por eje, también se muestra que las ductilidades con múltiples pilas por eje son más grandes que las pilas únicas por eje, pero también se puede observar la discordancia entre códigos de diseño en la ductilidad que se maneja para casos similares, por lo que se vuelve indispensable el realizar investigaciones de la afectación de la ductilidad en pilas de puente.

Tabla 2.2. Ductilidad en pilas (Caltrans 2010)

Ductilidad en pilas Caltrans 2010	
Caltrans 2010 - Apartado 2.2.4	
Elemento	Ductilidad máxima
Columnas únicas en bases rígidas	4
Multicolumnas en bases rígidas	5
Pila tipo muro en dirección débil	5
Pila tipo muro en dirección fuerte	1

Tabla 2.3. Ductilidad en pilas (AASHTO LRFD 2009)

Diseño sísmico de puentes AASHTO LRFD 2009 - Apartado 4.9

Elemento	Ductilidad máxima
Columnas únicas en bases rígidas	5
Multicolumnas en bases rígidas	6
Pila tipo muro en dirección débil	5
Pila tipo muro en dirección fuerte	1

Tabla 2.4. Ductilidad en pilas (CFE 2008)

Demandas de ductilidades máximas en pilas de puentes, CFE 2008

Comisión Federal de Electricidad 2008 - Tabla 10.4		
Demanda máxima de ductilidad		
Elemento	Nivel Servicio	Nivel de prevención de colapso
Pilas en voladizo	1	4
Pilas que forman parte de un marco	1.5	5
Pilas tipo muro en su dirección débil	1.5	5
Pilas tipo muro en su dirección fuerte	1	1.5

Tabla 2.5. Ductilidad en pilas (AASHTO standard 2002)

Ductilidad para diferentes tipos de pilas AASHTO standard 2002

AASHTO standard 2002 - Diseño Sísmico Tabla 3.7

Elemento	Ductilidad máxima
Pila tipo muro	2
Dos o más pilas	2
<i>Pila única</i>	3
<i>Múltiples columnas</i>	5

Tabla 2.6. Ductilidad en pilas (AASHTO LRFD 2010)

AASHTO LRFD 2010 Tabla 3.10.7.1.1

Elemento	Ductilidad para diferentes estructuras		
	Crítica	Esencial	Otros
Pilas tipo muro dirección largo	1.5	1.5	2
Pila única	1.5	2	3
Varias pilas	1.5	1.5	2
Pilas individuales	1	2	3

Tabla 2.7. Ductilidad en pilas (SCT 2005)

Factores de ductilidad en pilas de puentes SCT 2005

Secretaría de Comunicaciones y Transportes - N.PRY.CAR.6.01.005/01	
Elemento	Ductilidad máxima
Marco Dúctil	4
Cuando se apoya en neopreno	4
Pila continua con el tablero	2
Columnas aisladas	2
Elementos tipo muro	2
Mampostería	1

2.3 Forma de la sección transversal

Un aspecto importante, pero de poco estudio en la ductilidad que desarrollaran los elementos estructurales, es la forma de la sección transversal. Debido a la alta influencia que tiene el confinamiento transversal en la ductilidad, se vuelve primordial realizar estudios de la afectación en la capacidad de deformación de los elementos estructurales conforme a las diferentes formas de sección transversal que tengan las columnas o pilas de puente, ya que como se ha observado, una sección de forma circular presentará un mejor confinamiento que una sección de forma rectangular, esto quiere decir que las zonas en tensión se distribuyen uniformemente en una sección circular, mientras que en la sección de forma rectangular solo presentará un confinamiento aceptable en la esquinas de la sección. Entonces debido a que existen multitud de formas de sección transversal en pilas, el estudio de qué tanto puede llegar a afectar la forma de la sección transversal en la ductilidad que desarrollan es un tema que cobra relevancia.

2.4 Acero longitudinal

La principal virtud del acero longitudinal en un elemento estructural es la de evitar deflexiones excesivas, para así mantener la geometría de la estructura en su conjunto. También se ha demostrado mediante pruebas experimentales y analíticas, que el nivel de cuantía de acero longitudinal repercute directamente en la capacidad de ductilidad que desarrollaran los elementos estructurales. Al ser la cuantía de acero longitudinal un aspecto tan importante, se vuelve primordial realizar estudios de qué tanto puede llegar a afectar en la capacidad de deformación para un buen o un mal armado longitudinal en elementos estructurales primordiales, como lo son las columnas o las pilas de puente. Bae y Bayrak (2006) demostraron mediante pruebas experimentales, que un grado de sobre refuerzo de acero longitudinal en columnas, cargadas por esfuerzos laterales ocasionados por sismo, desarrollara menor ductilidad y por lo tanto la capacidad de deformación de las columnas o pilas se reduce significativamente en el rango no lineal. Esto puede ocasionar que el comportamiento de la estructura en general no sea el esperado, lo cual representa un problema de grandes dimensiones para el ingeniero diseñador, por lo que es un tema primordial a tomar en cuenta.

2.5 Acero Transversal

Mediante pruebas experimentales se ha demostrado que la cantidad y arreglo del acero transversal tiene gran impacto sobre la resistencia, o incluso, la ductilidad en elementos de concreto. Dicha ductilidad puede verse afectada por el tipo de refuerzo transversal que se coloque al espécimen (estribo o refuerzo helicoidal), en donde un refuerzo helicoidal produce un mejor confinamiento por una mejor distribución de los esfuerzos por carga a tensión del refuerzo. También, el refuerzo transversal rectangular o estribo, a pesar de que su confinamiento se produce básicamente cerca de las esquinas y en las zonas medias, aumenta la resistencia e incluso la ductilidad en los especímenes con concreto armado, comparado con un elemento sin acero transversal. Además, se ha demostrado que un correcto espaciado entre estribos brindara un mejor confinamiento del concreto, por lo que investigaciones realizadas por Mendoza, Aire y Fuentes (1995) demostraron que la resistencia a fluencia del acero de confinamiento transversal determina el límite superior de la presión de confinamiento. Una presión más alta de confinamiento aplicada al concreto del núcleo, a su vez, da como resultado alta resistencia y ductilidad. El refuerzo longitudinal y transversal bien distribuido da como resultado un área más grande de concreto efectivamente confinado y una distribución más uniforme de la presión de confinamiento, mejorando con ello la efectividad del refuerzo de confinamiento.

En la figura 2.1 se muestra los niveles de confinamiento transversal para un estribo rectangular o cuadrado y para un estribo helicoidal, donde se puede observar un mejor confinamiento para el estribo helicoidal, debido a que se distribuyen mejor los esfuerzos, mientras que el confinamiento del estribo rectangular o cuadrado solo presenta un buen confinamiento en las esquinas y al centro, por su propia geometría.

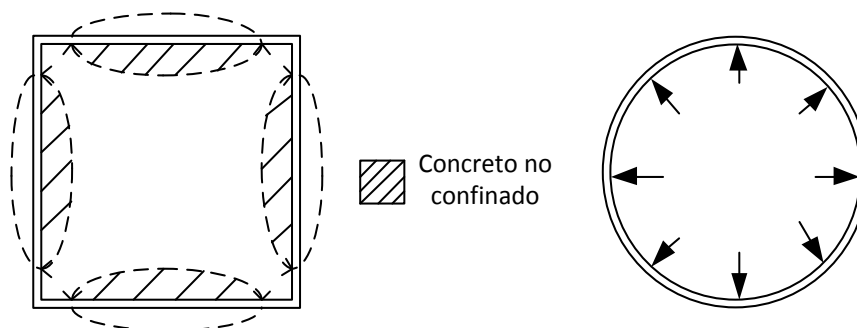


Figura 2.1. Confinamiento de estribos y refuerzo de hélice (Park y Paulay, 2009).

2.6 Rigidez efectiva

Es bien conocido que todas las estructuras de concreto sufrirán agrietamiento en algún punto de su vida útil, incluso desde el momento de su construcción debido a un agrietamiento por expansión y contracción volumétrica, por un mal fraguado, etc. Debido a estas consideraciones, es un punto debatible si para investigación es necesario agrietar la sección gruesa de los elementos estructurales o no, porque al agrietar la sección ya no se está representando las condiciones reales de una estructura recién construida, pero sí representa la degradación que tendrá la estructura a través del tiempo, incluso cuando el sismo de diseño impacte a la estructura y ya haya presentado algún tipo de agrietamiento anterior a dicho sismo. En la tabla 2.8 se observa los valores de rigidez efectiva propuestas por el FEMA 356 para distintos elementos de concreto reforzado.

Tabla 2.8. Rigidez efectiva (FEMA 356)

Caso	Flexión	Cortante
Vigas no presforzadas	$0.5E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Vigas presforzadas	$1E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Columnas $P \geq 0.5 \cdot f'_c \cdot A_g$	$0.7E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Columnas $P \leq 0.3 \cdot f'_c \cdot A_g$	$0.5E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Muro sin grieta	$0.8E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Muro agrietado	$0.5E_{clg}$	$0.4E_cA_w$
Losa no presforzada	-	$0.4E_cA_w$
Losa presforzada	-	$0.4E_cA_w$

2.7 Efectos P-Δ

Uno de los aspectos de mayor estudio y relevancia en los últimos tiempos, son los llamados efectos P-Δ o también llamados efectos de segundo orden, en donde la carga axial aplicada puede causar momentos secundarios y distorsiones, dichas distorsiones también se pueden definir por la relación del desplazamiento entre la altura. Mediante pruebas experimentales, como la realizada por Bae y Bayrak (2006), se demostró que el nivel de carga axial impuesta es fundamental en los efectos de segundo orden que se transmiten a la estructura, esto quiere decir que entre mayor sea la carga axial impuesta sobre el elemento estructural, los efectos P-Δ se amplificaran, y por lo tanto, los niveles de ductilidad de la estructura global disminuyen.

En muchas ocasiones, el diseño de los elementos en una estructura está determinado por un análisis elástico de primer orden. Este tipo de análisis consiste en la determinación de los elementos mecánicos (fuerzas y momentos internos) y cinemáticos (deformaciones) a partir de suponer que los materiales se mantienen elásticos y que la deformación de la estructura no genera acciones adicionales. Sin embargo, en estructuras sujetas a cargas altas y con grandes desplazamientos, existirán efectos internos adicionales que incrementan la resistencia requerida de los elementos estructurales. A estos efectos suele llamar efectos $P\Delta$ o $P\delta$. Para obtener la influencia de estos efectos será necesario entonces realizar un análisis elástico de segundo orden, el cual sigue considerando al material como elástico, pero ahora las deformaciones y las cargas se consideran en la generación de fuerzas y desplazamientos adicionales (efectos de segundo orden). Si por el contrario, se considerará la inelasticidad del material, pero se ignoraran los efectos de segundo orden, el análisis resultante sería inelástico de primer orden. Un análisis más integral implicaría que se consideren tanto la no linealidad del material como la no linealidad por los efectos de segundo orden, es decir, un análisis inelástico de segundo orden.

Las combinaciones de los análisis descritos con anterioridad se resumen en el esquema que se muestra en la Figura 2.2, mientras que en la Figura 2.3, se muestra las distintas metodologías de análisis, tanto de primer orden como de segundo orden, elásticas e inelásticas que nos da una idea de cuáles son las metodologías de análisis más precisas pero mucho más complejas (análisis inelástico de segundo orden) y cuáles son las más aproximadas pero más simples (análisis elástico de primer orden) (Perea, 2013).

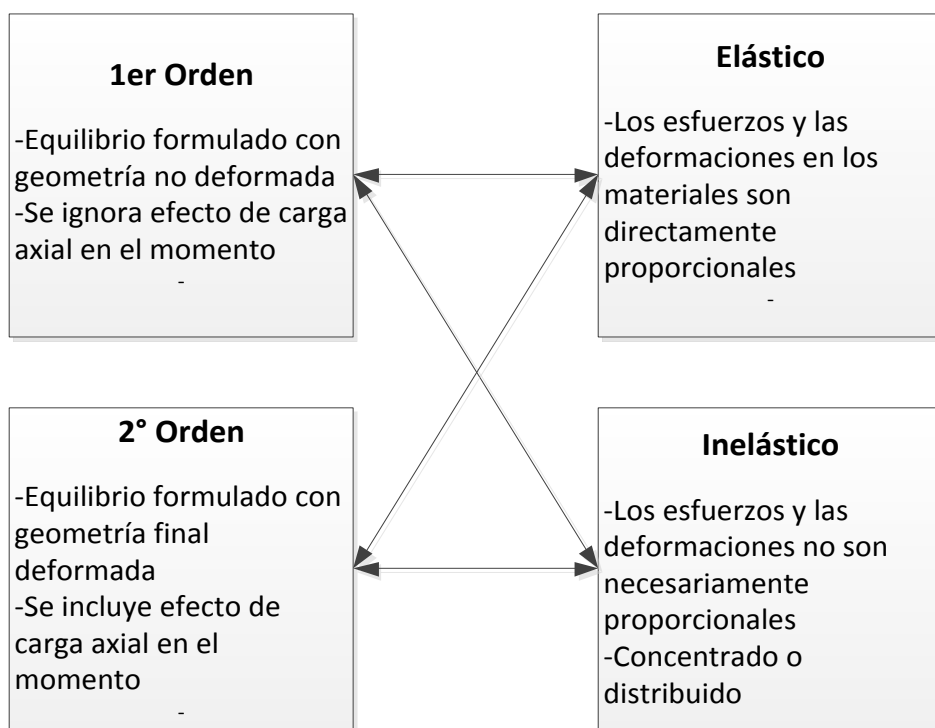


Figura 2.2. Diferentes categorías de análisis.

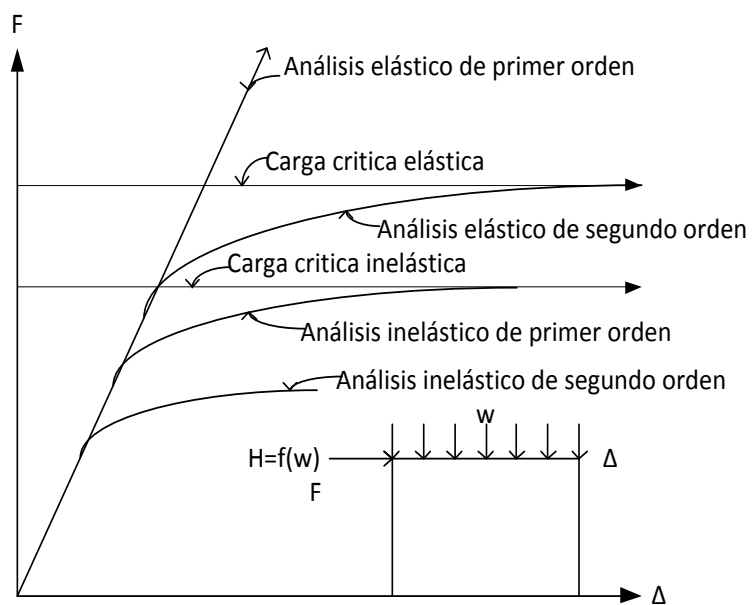


Figura 2.3 Gráfica de las diferentes categorías de análisis.

2.8 Interacción dinámica suelo estructura (IDSE)

Un aspecto relevante en la respuesta de las estructuras en suelos flexibles es la interacción dinámica suelo estructura, aunque en muchas ocasiones para su diseño en los despachos de cálculo solo se toma en cuenta las propiedades dinámicas de la estructura y no la interacción con el suelo.

Para algunos tipos de suelos será indispensable tomar en cuenta la condición de apoyo del sistema, ya que de ello dependerá en gran medida la respuesta integral de la estructura. La condición de apoyo dependerá del tipo de cimentación y del tipo de suelo donde esta desplantada la estructura, además de los desplazamientos relativos producto de la relación entre cimentación y suelo. Para suelos duros o poco flexibles, el desplazamiento relativo entre cimentación y suelo es muy pequeño, ya que se presenta una afinidad de rigideces, por lo que se le puede dar una condición al sistema como empotrado. Si por el contrario, el desplazamiento relativo entre la cimentación y el suelo es muy grande debido a la diferencia de rigideces entre el suelo y la cimentación, no se le podrá asignar la condición de apoyo fijo o empotrado y, en consecuencia, dicha discrepancia entre rigideces alterara la respuesta de la estructura.

La interacción dinámica suelo estructura depende de un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales entre el suelo y la estructura, ante un movimiento causado por una excitación generalmente proveniente de la naturaleza (aceleración). Los efectos cinemáticos serán causados por un movimiento que intentará acoplar los desplazamientos entre el suelo y la cimentación, debido a la diferencia de rigideces entre ambos sistemas. Por su parte, la interacción inercial del sistema será provocada al igualar los movimientos del suelo y la base de la estructura sin tomar en cuenta la masa de la estructura, por lo que el efecto de interacción provendrá de la flexibilidad del sistema. Algunas de las propiedades que modifica el efecto de interacción suelo estructura en una estructura son la reducción de las distorsiones de entrepiso, la modificación de los dispositivos de control, *cambio en la ductilidad*, cambio en la sobre resistencia, cambio en el mecanismo de colapso y la modificación en la eficiencia de muros de cortante (Pérez-Rocha y Avilés, 2003; Fernández y León, 2008).

En la figura 2.4 se indica la deformación de una estructura y los desplazamientos con las rotaciones generadas en el suelo en base rígida, y con interacción suelo estructura, debidos a una excitación externa generalmente proveniente de la naturaleza, como puede ser un sismo.

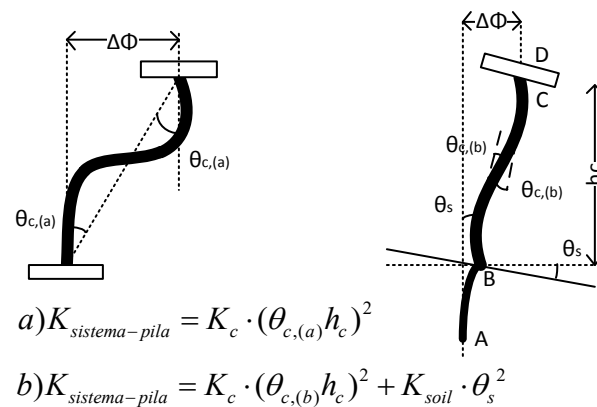


Figura 2.4. Subestructura de un puente pila-cimentación. a) Soporte empotrado b) Soporte flexible (Farantakis, Kotsoglou y Pantazopoulou 2014)

2.8.1 Funciones de impedancia

Las funciones de impedancia se definen como las funciones necesarias para el cálculo de las rigideces dinámicas de la cimentación, sin tomar en cuenta la masa de la estructura, la cual mediante fuerzas y momentos impuestos generara desplazamientos y giros armónicos unitarios respectivamente en la cimentación. En este caso, las condiciones del suelo serán representadas por medio de resortes para representar las rigidez (parte real) y amortiguadores (parte imaginaria), según el desplazamiento o la rotación impuesta.

Así, se define a las funciones de impedancia como la relación en estado estacionario entre la fuerza aplicada y el desplazamiento en dirección de la fuerza para una cimentación rígida, carente de masa y excitada armónicamente (Avilés, 2004).

$$\kappa = \bar{K} + i\omega C \quad (2.1)$$

donde:

\bar{K} = rigidez dinámica

C = coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente

ω = frecuencia excitadora

3 CAPÍTULO 3. SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS

Como se comentó previamente, este trabajo se aboca a un estudio paramétrico sobre la ductilidad de pilas de puentes carreteros comunes. La correcta comprensión de los parámetros que se utilizaron en los distintos modelos de análisis, ayudara al mejor entendimiento de los resultados obtenidos, por lo que se vuelve indispensable detallar cada uno de ellos. En este capítulo se describen los parámetros utilizados y el porqué de su aplicación en el trabajo de investigación. Para el análisis de la ductilidad de diferentes configuraciones estructurales de puentes se consideran algunos modelos específicos, los cuales se seleccionaron en función de los siguientes criterios:

- En todos los modelos estudiados se ha considerado que el neopreno de apoyo entre superestructura y subestructura es capaz de transmitir toda la fuerza cortante necesaria para generar el comportamiento inelástico de las pilas.
- Se ha considerado que los topes sísmicos son capaces de transmitir toda la fuerza cortante a las pilas.
- Los estribos se modelaron considerando el apoyo extremo simplemente apoyado, con grados de libertad en direcciones transversal y longitudinal del puente, esto es con la finalidad de permitir una libre deformación lateral de las pilas.
- Para los puentes de múltiples pilas por eje, en los nodos extremos superiores de las pilas se colocaron nodos esclavos, para simular el cabezal. Debido a la gran rigidez de estos elementos, los nodos responden a iguales desplazamientos laterales.

La configuración estructural de los puentes analizados, para todos los casos de estudio, contempla dos pilas extremas de igual longitud y una pila central de diferente altura con respecto a las pilas extremas para el caso de una pila por eje, mientras que para el caso de tres pilas por eje se contemplan tres pilas en cada extremo y tres pilas centrales de diferente altura. Además, se consideran mediante apoyos simples los accesos del puente y los nodos donde conecta la viga con la pila, lo cual quiere decir que los puentes analizados para todos los casos de estudio son isostáticos y que el momento generado en esa articulación es cero. También, las longitudes de los claros entre pilas para todos los modelos serán de 35 m, esto quiere decir que la longitud total del puente será de 140 m. Asimismo, se utilizara una *sección viga tipo cajón* para todos los modelos de análisis con distintas variaciones de alturas entre pilas, donde para todos los casos de análisis h_1 es igual a $0.5 h_2$, esto quiere decir que la columna central será el doble de larga que las pilas de los extremos, tal y como lo muestra la figura 3.1, en donde se puede observar la distribución de los elementos para todos los casos de estudio de esta investigación.

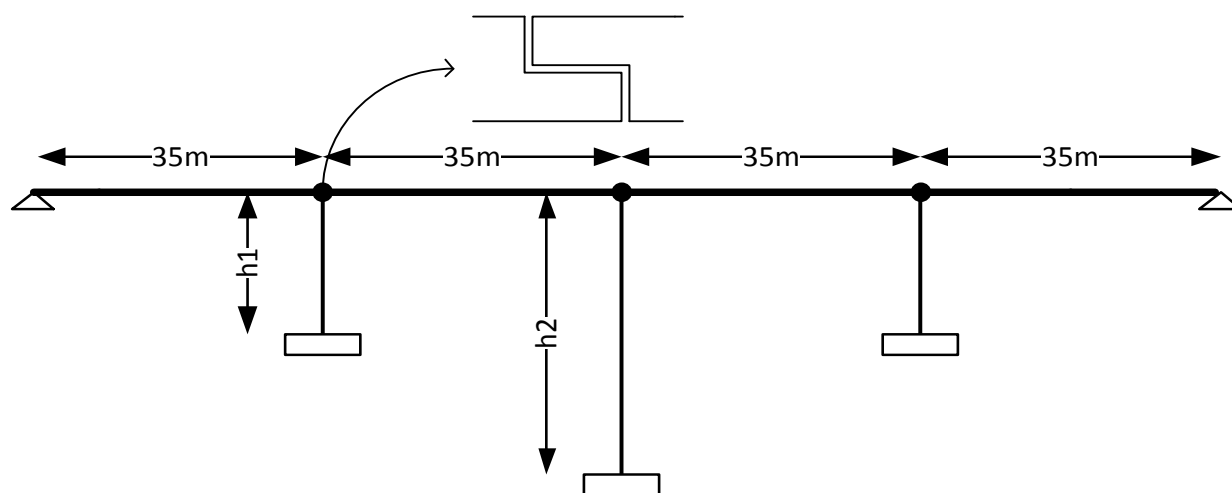


Figura 3.1. Modelo de análisis para todas los casos de estudio.

3.1 Variación de altura de las pilas

En la construcción de puentes la variabilidad del perfil del terreno es un tema de análisis que muchas veces define el número y dimensiones de las pilas, tal y como lo muestra la figura 3.2. Debido a esto, es cotidiano encontrar pilas de puente de diferente altura o también llamados puentes irregulares en subestructura, en un sinfín de casos. Por esto, es importante el realizar estudios de los efectos de esta variación de altura entre pilas, ya que una pila de menor longitud será menos esbelta y podría concentrar esfuerzos no deseados con respecto a la pila de mayor longitud, además las pilas más esbeltas trabajan principalmente a flexión y las cortas a cortante (J.E.B. Guirguis y S.S.F. Mehanny, 2012). En la presente investigación se observaran los efectos de variación de alturas en pilas en la ductilidad que desarrolla los modelos de análisis.

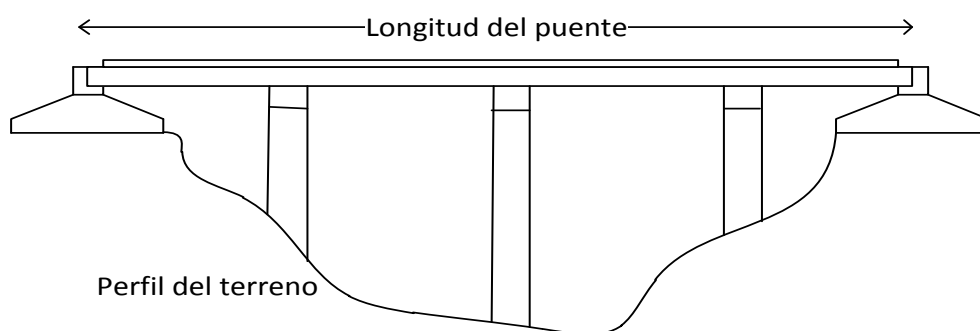


Figura 3.2. Distribución lateral característica de un puente carretero.

Para el trabajo de investigación se propusieron tres variaciones de altura para todos los modelos de estudio, en la figura 3.3 se muestra la primer variación entre alturas de las pilas de puente, donde h_1 es igual a 5 m y h_2 es igual a 10 m, la segunda variación entre alturas del puente se observa en la figura 3.4, donde h_1 es igual a 10 m y h_2 es igual a 20 m y, por último, en la figura 3.5 se indica la tercera variación entre alturas propuesta para los modelos de análisis, donde h_1 es igual a 20 m y h_2 es igual a 40 m.

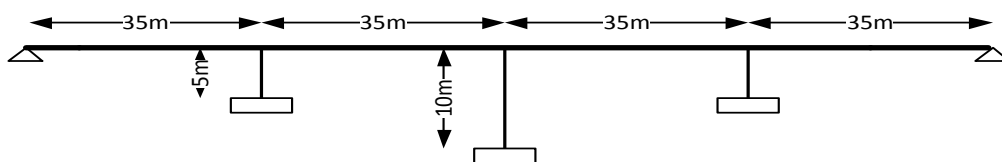


Figura 3.3. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 5 m y h_2 es igual a 10 m.

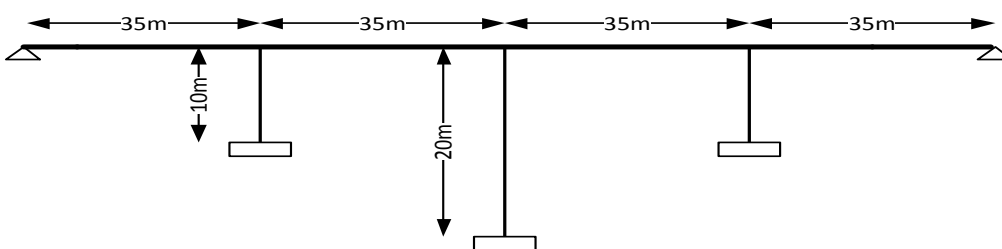


Figura 3.4. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 10 m y h_2 es igual a 20 m.

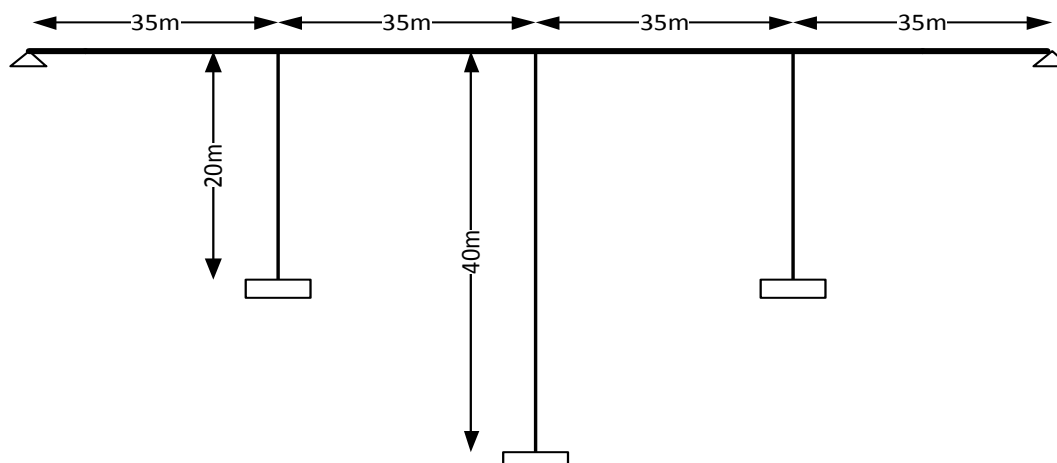


Figura 3.5. Variación de altura entre pilas donde, h_1 es igual a 20 m y h_2 es igual a 40 m.

3.2 Número de pilas por eje

Los distintos códigos de diseño recomiendan factores de ductilidad representados por pilas únicas y múltiples pilas por eje. En esta investigación, dicho parámetro es representado para pilas únicas, (una pila por eje) tal y como lo muestra la figura 3.6, y para múltiples pilas, representadas por tres pilas por eje, tal y como lo muestra la figura 3.7, en donde se puede observar la configuración estructural de la cantidad de pilas por eje de todos los puentes analizados.

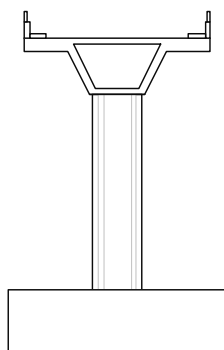


Figura 3.6. Modelos de análisis para puentes con pila única por eje.

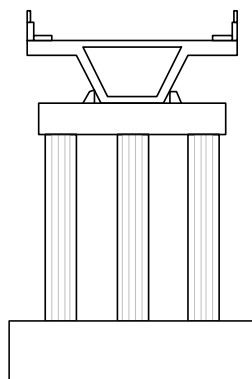


Figura 3.7. Modelos de análisis para puentes con múltiples pilas por eje.

3.3 Forma de la sección transversal de las pilas

La forma de la sección transversal para todos los modelos de análisis es otro parámetro impuesto en esta investigación, en donde se proponen pilas con sección transversal tipo muro, oblonga maciza y circular hueca, tal y como lo muestra la figura 3.8. La forma de la sección transversal para cada tipo de puente será la misma para las pilas extremas y para la pila central, esto quiere decir que para cada modelo se ocupara solo una sección transversal para todas las pilas, con un diseño adecuado para cada pila del puente.

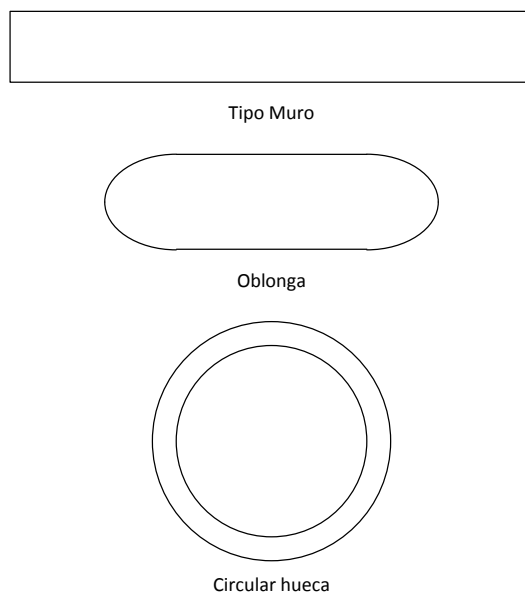


Figura 3.8. Forma de la sección transversal de los modelos de análisis.

3.4 Cuantía de acero longitudinal

Los diferentes códigos de diseño hacen recomendaciones respecto a la cuantía de acero longitudinal que deben de tener las columnas de las estructuras, coincidiendo en dar valores para un buen diseño del 1% al 4%, mediante una relación del área del acero de refuerzo longitudinal entre el área gruesa de concreto de la sección de análisis (ACI 318-05). En la presente investigación se propone un grado de escaso refuerzo longitudinal con cuantías menores al 1%, un grado de buen refuerzo longitudinal con cuantías que van del 1% al 4% y un grado de sobre refuerzo para una cuantía mayor al 4%, con el fin de observar los efectos en la ductilidad que desarrollan las pilas de los puentes de estudio, conforme al grado de acero longitudinal que se le asigne al diseño de las pilas de puente.

En la práctica pueden existir puentes con malos y buenos diseños, que pueden entrar en cualquiera de estas categorías de grado de acero longitudinal propuestas, por lo que se decidió, incluir estas tres opciones para determinar si realmente tienen una influencia en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente. En la tabla 3.3 se muestran los modelos de análisis para un grado de escaso refuerzo longitudinal, buen refuerzo longitudinal y para un grado de sobre refuerzo longitudinal, además de los porcentajes de acero longitudinal que se le dio a cada modelo de análisis.

3.5 Acero transversal

Un buen armado de refuerzo transversal de los elementos estructurales dará un mejor comportamiento a la estructura en su conjunto, por eso es de suma importancia el dar un buen confinamiento de acero transversal a los elementos estructurales (González Cuevas, 2015). Desgraciadamente en muchos casos, y debido a desconocimiento, o múltiples factores, los elementos estructurales tales como pilas de puentes no siempre tienen un buen armado de acero transversal, por lo que en esta investigación se propone obtener factores de ductilidad para un buen y mal armado de acero transversal de los modelos de estudio. Dicho parámetro busca verificar que tanto afecta o beneficia el tener un mal o un buen armado de acero transversal en las pilas de un puente carretero común (tabla 3.3).

El FEMA 356 en la tabla 6-8 da valores correspondientes a las rotaciones plásticas recomendadas para análisis no lineales de columnas de concreto reforzado, los cuales son representados por una letra *C* para considerar un buen armado de acero transversal y una *NC* para considerar un mal o nulo armado de acero transversal. En esta investigación no se diseñaron los estribos o también llamado acero transversal para las pilas de estudio, dicho diseño se ha considerado por medio las rotaciones que recomienda el FEMA 356, tal y como lo muestra la tabla 3.1. Esto quiere decir que el grado de acero transversal se le asignó a las pilas de todos los modelos de estudio mediante las rotaciones que recomienda el FEMA 356.

Tabla 3.1. Nivel de desempeño para columnas de concreto reforzado FEMA 356

$\frac{P}{A_g f'_c}$	Refuerzo transversal	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Nivel de desempeño	
			LS	CP
≤ 0.1	<i>C</i>	≤ 3	0.015	0.02
≤ 0.1	<i>C</i>	≥ 6	0.012	0.016
≥ 0.4	<i>C</i>	≤ 3	0.012	0.015
≥ 0.4	<i>C</i>	≥ 6	0.01	0.012
≤ 0.1	<i>NC</i>	≤ 3	0.005	0.006
≤ 0.1	<i>NC</i>	≥ 6	0.004	0.005
≥ 0.4	<i>NC</i>	≤ 3	0.002	0.003
≥ 0.4	<i>NC</i>	≥ 6	0.002	0.002

3.6 Rigidez efectiva

Un objetivo bastante interesante en esta investigación es averiguar que tanto influye agrietar el momento de inercia de la sección gruesa de los elementos estructurales de concreto reforzado en la ductilidad que desarrollan las pilas de los modelos de estudio. En investigación, y para estructuras a las cuales les podemos llamar “nuevas o recién construidas”, generalmente no se agrieta la sección gruesa de sus elementos, debido a que se estipula que no tendrá agrietamiento en el inicio de su vida útil, pero en la vida real el concreto es un material que se degrada, desde su implementación en cualquier elemento estructural, debido a un mal fraguado, expansión y contracción volumétrica, por la acción de agentes externos durante su vida útil, etc. Además, los puentes son diseñados para un tiempo de vida útil de cien años (AASHTO, 2007) por lo que seguramente tendrá agrietamiento por acciones provenientes de la naturaleza tales como sismos, previos a que se suscite el sismo de diseño. En esta investigación se planteó agrietar la sección de vigas y columnas para los distintos modelos de estudio. Además, se propuso para los mismos modelos de estudio no agrietar la sección gruesa de las vigas y pilas, esto quiere decir que no se disminuyó el momento de inercia de la sección, dichos modelos se muestran en la tabla 3.3, con el factor correspondiente con que se agrieto EcIg.

Para agrietar la sección gruesa de los elementos estructurales se revisaron las recomendaciones de los reglamentos del Distrito Federal (RCDF-04) y de la AASHTO (AASHTO, 2007) y FEMA 356 en los tres casos se propone un 50% de degradación, que fue el valor utilizado. Sin embargo, se considera que si las pilas tienen una degradación del 50% están próximas a su colapso, lo que significaría el colapso de puentes de pila única, tales efectos se observaran en los resultados obtenidos en esta investigación.

3.7 Efectos $P-\Delta$

Buena parte de los modelos analizados en esta investigación son sin tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$. Sin embargo, al ser un estudio paramétrico, se decidió que en algunos modelos se tomara en cuenta dicho efecto para observar si tiene algún tipo de afectación en la ductilidad que desarrollan las pilas de los puentes de análisis. Los modelos que se analizaron bajo este parámetro son modelos considerando un buen armado de acero longitudinal y transversal (en general un buen diseño) y además agrietando la sección gruesa de pilas y vigas (como recomiendan los códigos de diseño), debido a que se consideró que simulan más la realidad de los puentes carreteros comunes durante su vida útil. En la tabla 3.3 se resumen los modelos analizados bajo este parámetro y que nos darán una idea de la influencia de tomar en cuenta este efecto en pilas de puentes carreteros comunes.

3.8 Interacción suelo estructura

La influencia del tipo de suelo sobre las estructuras es un tema que no puede pasar inadvertido debido a la importancia en el comportamiento del sistema en su conjunto (Fernández y Dávalos, 2013). En la presente investigación, se propone tomar en cuenta la interacción suelo estructura para los modelos que se muestran en la tabla 3.3 y así poder observar los efectos en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes con interacción. Los parámetros a considerar en el análisis de los modelos con interacción suelo estructura, son para un tipo de suelo: duro, intermedio y blando, con propiedades típicas del suelo de estudio que se muestran en la tabla 3.2. Para los modelos analizados con interacción suelo estructura, no se tomaron en cuenta los efectos $P-\Delta$ y solo se consideró un buen armado de refuerzo longitudinal y transversal, además de tomar en cuenta la sección agrietada para vigas y pilas.

Tabla 3.2. Propiedades del suelo

Tipo de suelo	γ (t/m ³)	C_u (t/m ²)	E (t/m ²)	m_v (t/m ²)	ν	V_0 (m/s)
Suelo blando	1.1	2.2	229	0.057	0.49	69
Suelo intermedio	1.24	4	446	0.044	0.4	250
Suelo duro	1.48	15	1500	0	0.25	400

γ es el peso volumétrico, C_u es la cohesión, E es el módulo de elasticidad, m_v es el módulo de compresión volumétrica, ν es el módulo de Poisson y V_0 es la velocidad de propagación de las ondas

La tabla 3.3 es de suma importancia, ya que en ella se muestran todos los modelos analizados con los distintos parámetros propuestos en esta investigación, esto quiere decir que para entender que parámetro se le imprimió a cualquier modelo propuesto en este estudio, se tiene que observar dicha tabla, donde la letra M hace referencia a que se trata de un modelo de análisis con su respectiva numeración para diferenciarlo. Del modelo M001 al modelo M208 se le hizo un análisis estático no lineal (Sap2000), únicamente al modelo M209 se le hizo un análisis dinámico no lineal o también llamado paso a paso en el tiempo (Ruaumoko 3D), solo y exclusivamente a manera de comprobación y comparación de resultados.

Tabla 3.3. Modelos de análisis y parámetros impuestos.

Modelo	h1 (cm)	h2 (cm)	NPpE	FST	GdAL	GdAT	RE	EPD	Cuantía Acero %		Aplica	IDSE
									PC	PE		CAYTS
M001	500	1000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M002	1000	2000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M003	500	1000	3	Rectangular maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	6.21	6.21	No	Empotrado
M004	500	1000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M005	1000	2000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M006	2000	4000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.02	4.02	No	Empotrado
M007	500	1000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M008	2000	4000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M009	500	1000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M010	1000	2000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M011	2000	4000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.12	4.99	No	Empotrado
M012	500	1000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M013	2000	4000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M014	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M015	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M016	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	3.17	3.17	No	Empotrado
M017	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M018	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M019	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.5	1.5	No	Empotrado
M020	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M021	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M022	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M023	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M024	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	2.1	3.08	No	Empotrado
M025	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M026	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M027	500	1000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M028	1000	2000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M029	500	1000	3	Rectangular maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.51	0.79	No	Empotrado
M030	500	1000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M031	1000	2000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M032	2000	4000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.45	0.45	No	Empotrado
M033	500	1000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M034	2000	4000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M035	500	1000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M036	1000	2000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M037	2000	4000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.34	0.64	No	Empotrado
M038	500	1000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M039	2000	4000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M040	500	1000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M041	1000	2000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M042	500	1000	3	Rectangular maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	6.21	6.21	No	Empotrado
M043	500	1000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M044	1000	2000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado

Modelo	h1 (cm)	h2 (cm)	NPpE	FST	GdAL	GdAT	RE	EPD	Cuantía Acero %		IDSE	
									PC	PE	Aplica	CAyTS
M045	2000	4000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.02	4.02	No	Empotrado
M046	500	1000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M047	2000	4000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M048	500	1000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M049	1000	2000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M050	2000	4000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.12	4.99	No	Empotrado
M051	500	1000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M052	2000	4000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M053	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M054	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M055	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	3.17	3.17	No	Empotrado
M056	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M057	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M058	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.5	1.5	No	Empotrado
M059	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M060	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M061	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M062	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M063	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	2.1	3.08	No	Empotrado
M064	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M065	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M066	500	1000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M067	1000	2000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M068	500	1000	3	Rectangular maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.51	0.79	No	Empotrado
M069	500	1000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M070	1000	2000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M071	2000	4000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.45	0.45	No	Empotrado
M072	500	1000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M073	2000	4000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M074	500	1000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M075	1000	2000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M076	2000	4000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.34	0.64	No	Empotrado
M077	500	1000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M078	2000	4000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	Eclg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M079	500	1000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M080	1000	2000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M081	500	1000	3	Rectangular maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	6.21	6.21	No	Empotrado
M082	500	1000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M083	1000	2000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M084	2000	4000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.02	4.02	No	Empotrado
M085	500	1000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M086	2000	4000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M087	500	1000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M088	1000	2000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M089	2000	4000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.12	4.99	No	Empotrado
M090	500	1000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M091	2000	4000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M092	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M093	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M094	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	3.17	3.17	No	Empotrado
M095	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M096	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M097	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.5	1.5	No	Empotrado
M098	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M099	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M100	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M101	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M102	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	2.1	3.08	No	Empotrado
M103	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M104	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M105	500	1000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Malo	0.5Eclg	No	0.58	0.86	No	Empotrado

Modelo	h1 (cm)	h2 (cm)	NPpE	FST	GdAL	GdAT	RE	EPD	Cuantía Acero %		Aplica	IDSE
									PC	PE		CAYTS
M106	1000	2000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M107	500	1000	3	Rectangular maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.51	0.79	No	Empotrado
M108	500	1000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M109	1000	2000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M110	2000	4000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.45	0.45	No	Empotrado
M111	500	1000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M112	2000	4000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M113	500	1000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M114	1000	2000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M115	2000	4000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.34	0.64	No	Empotrado
M116	500	1000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M117	2000	4000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Malo	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M118	500	1000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M119	1000	2000	1	Tipo muro	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	5.13	5.13	No	Empotrado
M120	500	1000	3	Rectangular maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	6.21	6.21	No	Empotrado
M121	500	1000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M122	1000	2000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M123	2000	4000	1	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.02	4.02	No	Empotrado
M124	500	1000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M125	2000	4000	3	Oblonga maciza	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	6.32	4.59	No	Empotrado
M126	500	1000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M127	1000	2000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M128	2000	4000	1	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.12	4.99	No	Empotrado
M129	500	1000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M130	2000	4000	3	Circular hueca	Sobre refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	4.12	6.26	No	Empotrado
M131	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M132	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.58	1.58	No	Empotrado
M133	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	3.17	3.17	No	Empotrado
M134	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M135	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M136	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.5	1.5	No	Empotrado
M137	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M138	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	1.95	1.71	No	Empotrado
M139	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M140	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M141	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	2.1	3.08	No	Empotrado
M142	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M143	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	2.1	3.19	No	Empotrado
M144	500	1000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M145	1000	2000	1	Tipo muro	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.58	0.86	No	Empotrado
M146	500	1000	3	Rectangular maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.51	0.79	No	Empotrado
M147	500	1000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M148	1000	2000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M149	2000	4000	1	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.45	0.45	No	Empotrado
M150	500	1000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M151	2000	4000	3	Oblonga maciza	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.47	0.66	No	Empotrado
M152	500	1000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M153	1000	2000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M154	2000	4000	1	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.34	0.64	No	Empotrado
M155	500	1000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M156	2000	4000	3	Circular hueca	Escaso refuerzo	Bueno	0.5EcIg	No	0.31	0.8	No	Empotrado
M157	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.58	1.58	No	Empotrado
M158	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.58	1.58	No	Empotrado
M159	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	3.17	3.17	No	Empotrado
M160	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.95	1.71	No	Empotrado
M161	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.95	1.71	No	Empotrado
M162	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.5	1.5	No	Empotrado
M163	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.95	1.71	No	Empotrado
M164	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	1.95	1.71	No	Empotrado
M165	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	2.1	3.19	No	Empotrado
M166	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5EcIg	Si	2.1	3.19	No	Empotrado

Modelo	h1 (cm)	h2 (cm)	NPpE	FST	GdAL	GdAT	RE	EPD	Cuantía Acero %		Aplica	IDSE	
									PC	PE		CAYTS	
M167	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	Si	2.1	3.08	No	Empotrado	
M168	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	Si	2.1	3.19	No	Empotrado	
M169	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	Si	2.1	3.19	No	Empotrado	
M170	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Blando	
M171	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Blando	
M172	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	3.17	3.17	SI	Blando	
M173	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Blando	
M174	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Blando	
M175	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.5	1.5	SI	Blando	
M176	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Blando	
M177	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Blando	
M178	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Blando	
M179	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Blando	
M180	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.08	SI	Blando	
M181	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Blando	
M182	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Blando	
M183	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Intermedio	
M184	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Intermedio	
M185	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	3.17	3.17	SI	Intermedio	
M186	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Intermedio	
M187	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Intermedio	
M188	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.5	1.5	SI	Intermedio	
M189	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Intermedio	
M190	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Intermedio	
M191	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Intermedio	
M192	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Intermedio	
M193	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.08	SI	Intermedio	
M194	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Intermedio	
M195	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Intermedio	
M196	500	1000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Duro	
M197	1000	2000	1	Tipo muro	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.58	1.58	SI	Duro	
M198	500	1000	3	Rectangular maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	3.17	3.17	SI	Duro	
M199	500	1000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Duro	
M200	1000	2000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Duro	
M201	2000	4000	1	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.5	1.5	SI	Duro	
M202	500	1000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Duro	
M203	2000	4000	3	Oblonga maciza	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	1.95	1.71	SI	Duro	
M204	500	1000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Duro	
M205	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Duro	
M206	2000	4000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.08	SI	Duro	
M207	500	1000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Duro	
M208	2000	4000	3	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	SI	Duro	
M209	1000	2000	1	Circular hueca	Buen refuerzo	Bueno	0.5Eclg	No	2.1	3.19	No	Empotrado	

h1 es la altura de las pilas de los extremos, h2 es la altura de la pila central, NPpE es el número de pilas por eje, FST es la forma de la sección transversal, GdAL es el grado de acero longitudinal, GdAT es el grado de acero transversal, RE es la rigidez efectiva a flexión, EPD es si se tomó en consideración los efectos P-Delta, IDSE es la interacción dinámica suelo estructura donde CAYTS es la condición de apoyo de los modelos y el tipo de suelo, PC es la pila central, mientras que PE es la pila extrema del puente.

4 CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS PUENTES

El correcto análisis y diseño de cada uno de los aspectos que conforman una estructura, dará un comportamiento adecuado a todo el sistema estructural, por lo que es de suma importancia el garantizar un óptimo desempeño de la estructura, por medio de una buena concepción del problema estructural, a nivel material, sección, elemento y sistema en conjunto. En este capítulo se comentarán las distintas metodologías utilizadas para el correcto análisis y diseño de los puentes de estudio.

4.1 Diseño de las pilas

4.1.1 Materiales

Como se explicó en el párrafo anterior, para que la estructura en su conjunto tenga un buen comportamiento, primero se debe de visualizar que tipo de estructura es la que se va a analizar y que se necesita para que dicha estructura trabaje adecuadamente ante todas las posibles acciones que sufra en su vida útil. En el caso particular de esta investigación, se realizaron estudios paramétricos a pilas de puentes comunes sujetas ante la acción de un sismo, para posteriormente obtener factores de ductilidad tomando en cuenta múltiples parámetros explicados en capítulos anteriores de este trabajo de investigación. Teniendo en cuenta esto, se procedió a diseñar los elementos estructurales de un puente carretero común, sujeto a la acción de un sismo.

Para el diseño de las pilas se consideró un esfuerzo a compresión del concreto (f'_c) de 350 kg/cm², mientras que es esfuerzo de fluencia (f_y) utilizado para el refuerzo longitudinal fue de 4200 kg/cm². Estos valores de esfuerzo a compresión del concreto y esfuerzo de fluencia del acero corresponden a cantidades comunes que generalmente se utilizan en la práctica en México para puentes comunes. Además, se recomienda agregarle un 10% al f'_c por efectos de sobre resistencia (Terán, 2015), mientras que para el caso del acero de refuerzo se recomiendan valores de sobre resistencia de $f_y = 4577$ kg/cm², y esfuerzo último de 7491 kg/cm², para varillas de diámetros del número 5 o mayores y valores $f_y = 4609$ kg/cm², y esfuerzo último de 7436 kg/cm², para varillas del número 4 o menores (Rodríguez y Botero, 1995). Para el caso de esta investigación se optó por hacer estudios paramétricos tomando en cuenta las propiedades de los materiales utilizadas generalmente en la práctica y también tomando en cuenta la sobre resistencia de los materiales.

A falta de una reglamentación propia para puentes en México, se siguieron las recomendaciones de la AASHTO (2007). Sin embargo, para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto se utilizó lo que estipula las NTC-DF 2004 para diseño de estructuras de concreto, ya que está relacionado materiales locales producidos en México, explícitamente, el valor referente al módulo de elasticidad del concreto (E), se calculó mediante:

$$E = 14000 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (4.1)$$

donde E y f'_c son el módulo de elasticidad y el esfuerzo a compresión del concreto respectivamente.

Por lo que respecta al módulo de elasticidad del acero, existen diferentes valores para este factor, por lo que se decidió optar por el módulo de elasticidad que recomienda el ACI 318M para acero de refuerzo con un valor de 2039360 kg/cm². El peso volumétrico que se utilizó para el concreto es de 2.4E-03 kg/cm³, debido a que se consideró que es un concreto reforzado para el diseño de pilas de puente, y además el peso volumétrico que se utilizó para el acero de refuerzo fue de 7.849E-03 kg/cm³ (Varillas), mientras que los valores utilizados del módulo de Poisson del concreto y el acero son de 0.2 y de 0.3, respectivamente.

4.1.2 Rigidez efectiva

Para esta investigación se decidió considerar como un parámetro más de análisis, agrietar y no agrietar la sección gruesa de vigas y pila. En un caso se consideró no agrietar el momento de inercia de la sección gruesa, por lo que la rigidez a flexión es EcI_g , mientras que en otro caso se modificó la rigidez a flexión con las recomendaciones que dicta el FEMA 356 (2000), y que se observan en la tabla 2.8, tomando un agrietamiento de la sección igual a $0.5EcI_g$, en donde Ec representa el módulo de elasticidad del concreto e I_g es el momento de inercia de la sección gruesa en la dirección de análisis.

4.1.3 Amortiguamiento

Todas las estructuras manejan un cierto nivel de amortiguamiento por cuestiones inherentes al propio sistema. Para estructuras de concreto se recomienda un amortiguamiento del 5 %, debido en gran medida a que la estructura cuando es sometida a una excitación, desarrollará un cierto nivel de amortiguamiento por las grietas que se formen, al deformarse la estructura, y a la fricción entre elementos al desplazarse la estructura. Entonces, en esta investigación se consideró un amortiguamiento de la estructura del 5 %.

4.1.4 Diseño a flexo-compresión

Para el diseño a flexo-compresión de las pilas se utilizó el código de diseño americano ACI 318-05, debido a que es un código de diseño más conservador y a que es el que viene predeterminado en el software de análisis para la obtención de los diagramas de interacción (SAP 2000 v14). En el apartado 10.3.1 a 10.3.3 de este reglamento nos indican que el diseño de las secciones transversales sometidas a cargas de flexión, o cargas axiales, o a la combinación de ambas, debe basarse en el equilibrio y la compatibilidad de deformaciones.

La condición de falla balanceada existe en una sección transversal cuando el refuerzo a tensión alcanza la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de fluencia 0.0021, al mismo tiempo que el concreto alcanza su deformación unitaria ultima de 0.003. Esto quiere decir que la falla balanceada se da cuando el concreto y el acero alcanzan su deformación unitaria última.

Las secciones se denominan controladas por compresión si la deformación unitaria neta a tensión en el acero extremo en tensión, ϵ_t , es igual o menor que el límite de deformación unitaria controlada por compresión, cuando el concreto en compresión alcanza su deformación ultima supuesta de 0.003. Las secciones son controladas por tensión si la deformación unitaria neta de tensión en el acero extremo en tensión, ϵ_t , es igual o mayor a 0.005, tal y como se muestra en la figura 4.1.

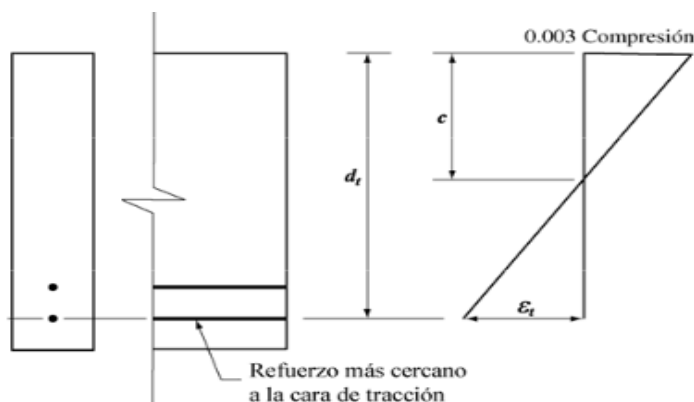


Figura.4.1. Distribución de la deformación unitaria y deformación unitaria neta a tensión (ACI 318-05).

La carga axial de diseño que desarrollará la pila será calculada mediante la ecuación 4.2 propuesta por el ACI 318-2005.

$$\phi P_{n(max)} = 0.8\phi \left[0.85 \cdot f'_c (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \right] \quad (4.2)$$

donde:

ϕ = Factor de reducción a flexión

$P_{n(max)}$ = Carga axial de diseño

f'_c = Esfuerzo a compresión del concreto

A_g = Área gruesa de la sección transversal

A_{st} = Área de acero de refuerzo de la sección transversal

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

Para elementos a flexión y con carga axial a compresión menor que $0.1f'_c \cdot A_g$, ϵ_t en el estado de resistencia nominal no debe de ser menor a 0.004.

Las columnas de esquina y otras que estén expuestas a momentos conocidos, que ocurren simultáneamente en dos direcciones, deben diseñarse a flexión biaxial y por carga axial. Una ecuación simple, que muestra resultados conservadores, es la ecuación 4.2.

$$\frac{1}{P_{ni}} = \frac{1}{P_{nx}} + \frac{1}{P_{ny}} - \frac{1}{P_0} \quad (4.3)$$

donde:

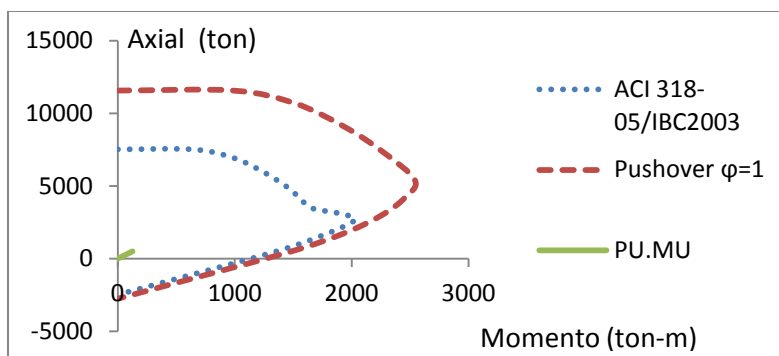
P_{ni} = Carga nominal biaxial

P_0 = Carga nominal cuando la excentricidad es cero

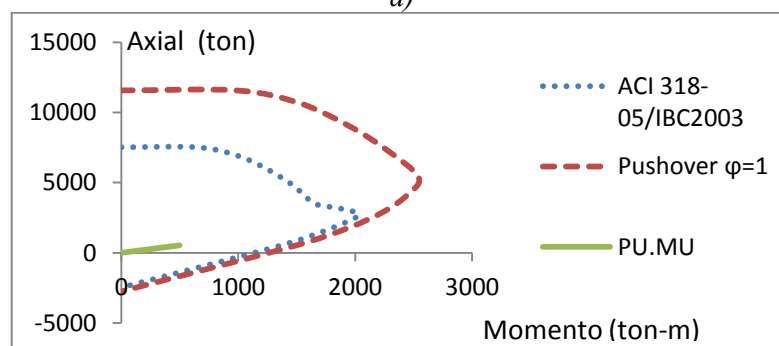
P_{nx} = Carga nominal con excentricidad en dirección x

P_{ny} = Carga nominal con excentricidad en dirección y

Como ejemplo, en la figura 4.2 se muestran los diagrama de interacción de la pila central y extrema del modelo M131 en su dirección longitudinal, mientras que en la figura 4.3 se observa el diagrama de interacción de la pila central y pila extremo, pero en su dirección transversal, con el momento de inercia de la sección agrietado en ambas direcciones de análisis. Dichos diagramas se obtuvieron considerando las ecuaciones 4.2 y 4.3, donde la línea continua representa la carga axial última y el momento último del modelo de análisis, la línea discontinua representa el diagrama de interacción sin tomar en cuenta factores de reducción con los cuales se realizó el análisis estático no lineal o pushover y la línea punteada representa el diagrama de interacción de diseño tomando en cuenta los factores de reducción propuestos por el código ACI 318-05, para pilas centrales y extremas en su dirección longitudinal y transversal.

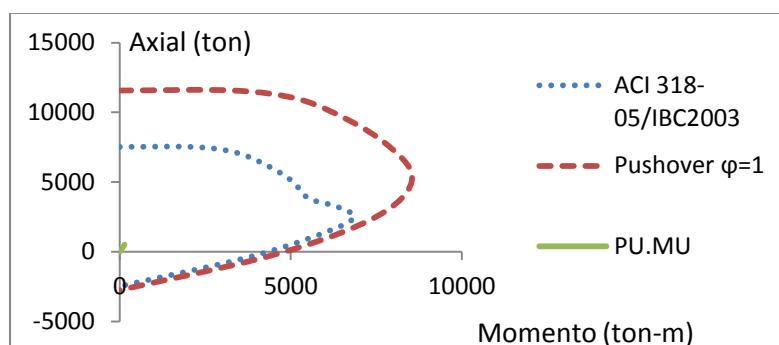


a)

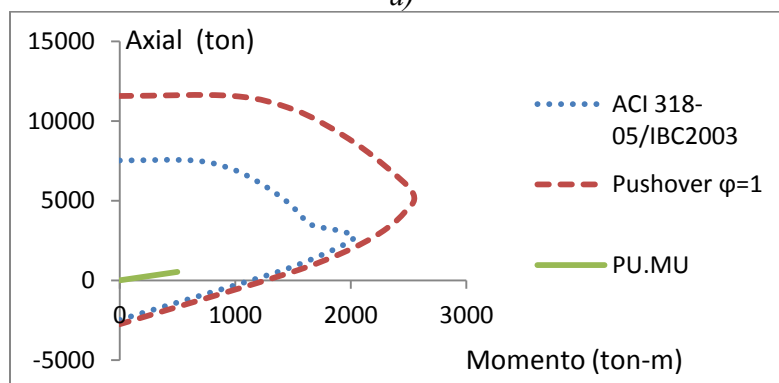


b)

Figura.4.2. Diagrama de interacción del modelo M131 en su dirección longitudinal (ACI 318-05), a) Pila central, b) Pila extremo.



a)



b)

Figura.4.3. Diagrama de interacción del modelo M131 en su dirección transversal (ACI 318-05), a) Pila central, b) Pila extremo.

4.1.5 Relación de esbeltez

Conforme a la reglamentación, en miembros restringidos lateralmente, los efectos de esbeltez podrán despreciarse siempre y cuando la relación entre el factor H' y el radio de giro (r) de la sección en la dirección considerada sea menor que $34 - 12M_1 / M_2$, donde M_1 es el menor y M_2 es el mayor de los momentos flexionantes en los extremos del miembro. El cociente M_1 / M_2 es positivo cuando el miembro se encuentra en curvatura simple y negativa cuando se encuentra en curvatura doble. Si $M_1 = M_2 = 0$ dicho cociente se tomara igual a 1.0. En ningún caso la relación de esbeltez debe ser mayor que 100.

Para la revisión por esbeltez del modelo M131 se calcula el factor k con la ecuación 4.3.

$$k = 1.35 - \sqrt{1.35 \cdot (1.35 - k_A - k_B) + [0.5 \cdot (k_A^2 + k_B^2)]} \quad (4.3)$$

donde:

$$k_A = 0.5 \text{ y } k_B = 0.638.$$

Por lo que:

$$k = 0.566$$

Además, de la ecuación 4.4 se obtiene el valor de H'

$$H' = L_c \cdot k \quad (4.4)$$

donde:

L_c = longitud de la pila

k = factor del nomograma calculado con la ecuación 4.3

Para el caso del modelo M131 se tiene:

$$L_c = 1000 \text{ cm}$$

$$k = 0.566$$

Radio de giro

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4.5)$$

donde:

I = momento de inercia en la dirección de análisis

A = área de la sección gruesa

Para el caso del modelo de análisis se tiene:

$$r = 28.866 \text{ cm}$$

$$\frac{H'}{r} = 19.61$$

Por lo que:

$$34 - 12M_1 / M_2 = 34$$

Entonces:

$$\frac{H'}{r} \leq 34 - 12M_1 / M_2 ; \text{ Se desprecian los efectos de esbeltez.}$$

$$\frac{H'}{r} \leq 100 ; \text{ No se tomaran en cuenta los efectos de segundo orden, conforme a la reglamentación.}$$

4.1.6 Combinación de cargas

La combinación de cargas en el diseño de las pilas de los puentes de estudio se dio a partir de las ocho combinaciones básicas de diseño, esto quiere decir que se propusieron ocho combinaciones basadas en la Regla del 30%, bajo la siguiente condición $1.3 \cdot CM \pm 1 \cdot S_x \pm 0.3 \cdot S_y$, más otra combinación por cargas gravitacionales, por lo que las combinaciones de diseño utilizadas son:

Combinación 1: $1.3 \cdot CM + 1 \cdot S_x + 0.3 \cdot S_y$

Combinación 2: $1.3 \cdot CM + 1 \cdot S_x - 0.3 \cdot S_y$

Combinación 3: $1.3 \cdot CM - 1 \cdot S_x + 0.3 \cdot S_y$

Combinación 4: $1.3 \cdot CM - 1 \cdot S_x - 0.3 \cdot S_y$

Combinación 5: $1.3 \cdot CM + 0.3 \cdot S_x + 1 \cdot S_y$

Combinación 6: $1.3 \cdot CM + 0.3 \cdot S_x - 1 \cdot S_y$

Combinación 7: $1.3 \cdot CM - 0.3 \cdot S_x + 1 \cdot S_y$

Combinación 8: $1.3 \cdot CM - 0.3 \cdot S_x - 1 \cdot S_y$

Combinación 9: $1.3 \cdot CM$

El factor de carga de 1.3 para la carga muerta es un factor recomendado por el AASHTO para este tipo de estructuras. A partir de las combinaciones anteriores, se determinó su envolvente de diseño, con lo cual se definieron los elementos mecánicos de diseño. Con estos valores se diseñaron todas las pilas de todos los puentes de estudio.

3.1.1 Selección del sismo de diseño

Debido a que en esta investigación se realizaran estudios paramétricos de la demanda de ductilidad en pilas de puentes comunes, y a que previo a esta investigación ya se obtuvieron factores de ductilidad para diferentes parámetros (Mendoza, 2014), se decidió utilizar el mismo espectro de diseño elástico que se utilizó en la investigación anterior.

En la figura 4.4 se muestra el espectro elástico de diseño utilizado, el cual fue calculado de acuerdo al manual de obras civiles de la CFE-2008, complementándose con la regionalización sísmica que propone el manual de obras civiles de la CFE-1993. Específicamente, el espectro de diseño en roca se calculó para la población de Santa María Huatulco en el Estado de Oaxaca, correspondiente a la zona D de la regionalización sísmica de México (Mendoza, 2014).

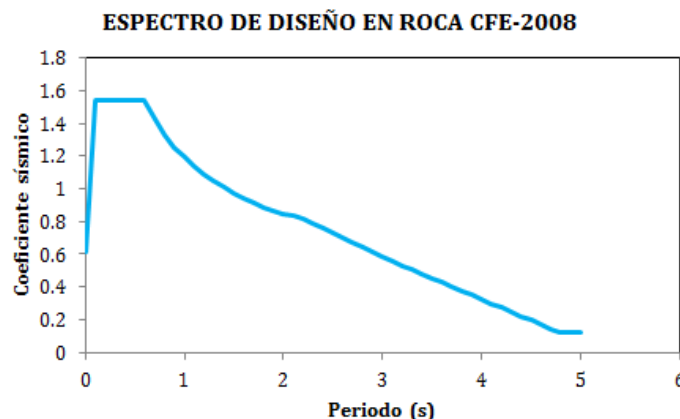


Figura.4.4. Espectro elástico de diseño en roca. Santa María Huatulco, CFE-2008 (Mendoza, 2014)

4.2 Diseño de la Trabe

Se tomó la misma trabe de diseño que en el trabajo de Mendoza 2014, para simular condiciones similares de la superestructura y tener un punto de comparación apropiado para una posterior comparación de resultados entre ambos trabajos. La trabe de diseño se trata de una trabe tipo cajón tal y como se muestra en la figura 4.5, la cual es representada por cada uno de los elementos estructurales que compone un puente. La trabe se consideró elástica y por tanto, para el análisis se evalúa solo como peso que le transmite a la subestructura.

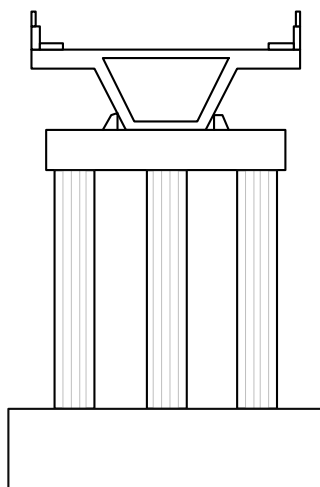


Figura.4.5. Elementos estructurales que conforman un puente típico

En la figura 4.6 se observa la sección transversal para la pila extremo en dirección longitudinal del modelo M131 con el armado longitudinal y las dimensiones obtenidas en base al diseño propuesto.

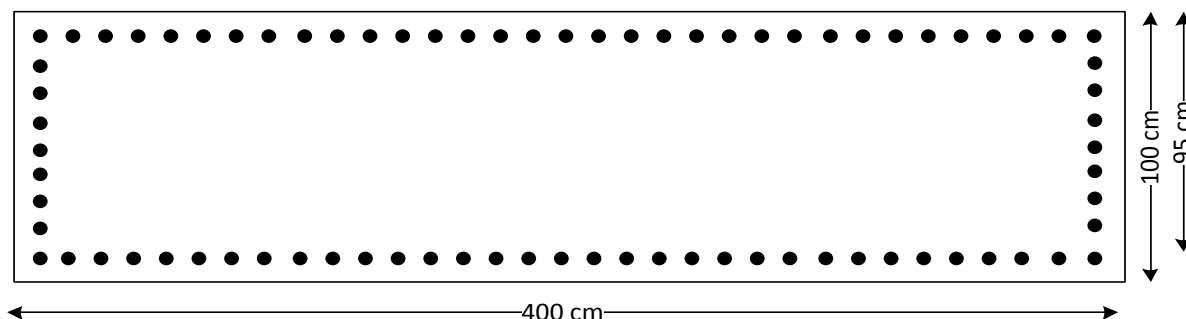


Figura.4.6. Sección transversal de la pila extremo del modelo M131 con 80V#10@12.5cm

4.3 Diseño de la cimentación

Previo al análisis con interacción suelo estructura se procedió a diseñar la cimentación para cada modelo de estudio y cada tipo de suelo, en donde la estructura de cimentación propuesta para los puentes con pila única por eje, fue a base de zapatas aisladas y pilotes de concreto a fricción. Para el caso de los puentes con múltiples pilas por eje se diseñó una zapata corrida con configuración similar a la de las pilas únicas tal y como lo muestra la figura 4.7 y pilotes de fricción. Para los modelos donde no era necesario colocar pilotes (comúnmente en suelo duro), se diseñó solo una zapata aislada o una zapata corrida dependiendo de la cantidad de pilas por eje.

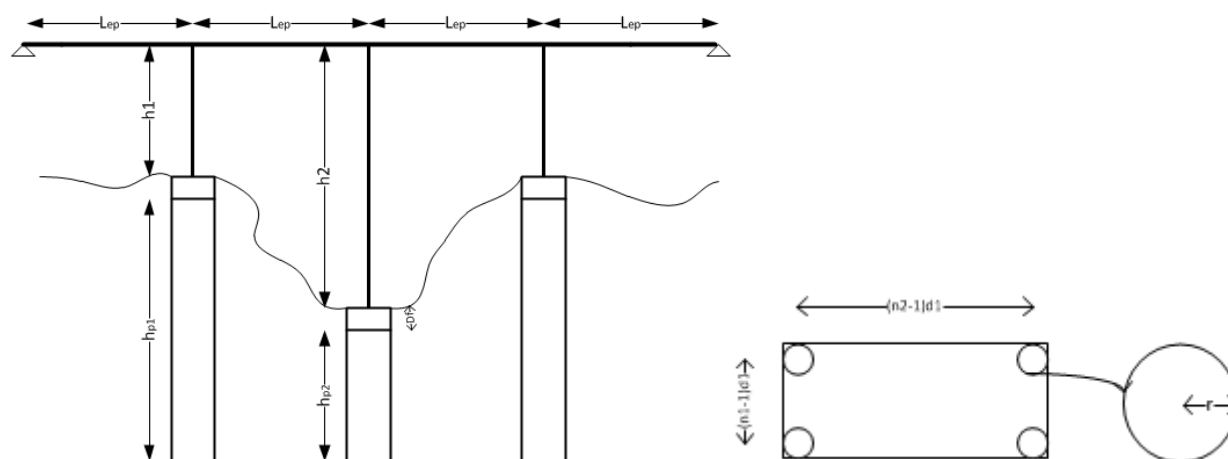


Figura 4.7. Sistema de cimentación a base de zapatas y pilotes propuesto para los modelos de análisis con interacción suelo estructura.

Para todos los modelos de estudio se propuso un estrato homogéneo con una profundidad del estrato de 38 m, debido a que esta profundidad de estrato se ha utilizado en investigaciones anteriores y se tiene una referencia de un valor de profundidad de estrato con óptimo desempeño (Fernández y Dávalos, 2013), mismo caso que para la velocidad de propagación de ondas para todos los tipos de suelo (Fernández y Martínez, 2014).

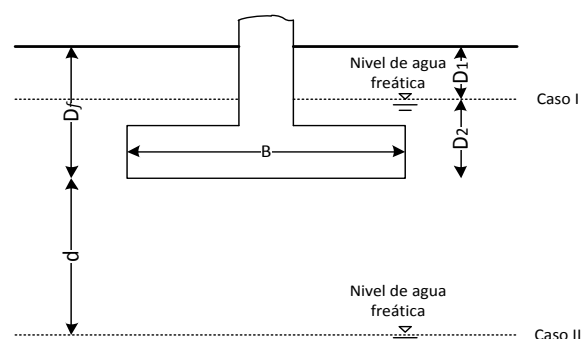
A continuación se indican las distintas hipótesis que se utilizaron para el diseño de la cimentación por capacidad de carga y por asentamiento, para una cimentación superficial y para una cimentación profunda de todos los modelos de análisis con interacción suelo estructura.

4.3.1 Cimentación superficial

Como primer paso para el diseño de la cimentación de los distintos puentes de estudio se procedió a diseñar una cimentación superficial, a base de zapatas aisladas para el caso de pila única por eje y de zapata corrida para el caso de múltiples pilas por eje. Durante el proceso se revisó la cimentación por capacidad de carga y por asentamiento para todos los suelos de estudio, en el caso de que la cimentación no cumpliera por capacidad de carga o asentamiento se procedió a diseñar otro tipo de cimentación, incluyendo pilotes de cimentación.

4.3.1.1 Capacidad de carga

En la Figura 4.8 se observan los tres casos en dónde se podría encontrar la cimentación superficial a base de zapatas aisladas o corridas, para tomar en cuenta el nivel de aguas freáticas en el diseño de la cimentación superficial, a partir de lo que se define como el nivel de aguas freáticas. También se tomaron en cuenta las excentricidades generadas por el momento impuesto en la base empotrada, tal y como se muestra en la figura 4.9.



Caso I $0 \leq D_1 \leq D_f$

$$q = \text{sobre carga efectiva} = D_1 \gamma + D_2 (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)$$

γ en el valor correspondiente a la fricción se reemplaza por $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$

Caso II $0 \leq d \leq B$

$$q = \gamma D_f$$

γ en el valor correspondiente a la fricción se reemplaza por $\gamma' = \gamma' + (d/B) (\gamma - \gamma')$

Caso III $d \geq B$ NAF no afecta

Figura 4.8. Diseño por capacidad de carga, nivel de aguas freáticas (Sordo Zabay, 2012)

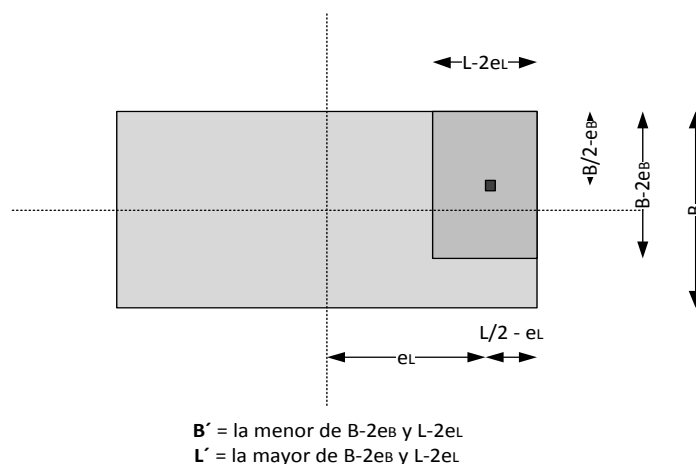


Figura 4.9. Diseño para cimentaciones cargadas excéntricamente

En la ecuación 5.6 se muestra la formulación general a corte generalizado por capacidad de carga de cimentaciones superficiales.

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5\gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (4.6)$$

El primer término de la ecuación 4.6 hace referencia a la cohesión de suelo, el segundo término toma en cuenta la sobre carga de la cimentación y el tercer término hace referencia a la fricción del suelo de análisis. Además, la ecuación $q_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma B N_\gamma$ se usa para deformaciones planas (esto es zapata de longitud infinita). También, N_c , N_q y N_γ son los factores de capacidad de carga; F_{cs} , F_{qs} , $F_{\gamma s}$ son los factores de forma, F_{cd} , F_{qd} , $F_{\gamma d}$ son los factores de profundidad y F_{ci} , F_{qi} , $F_{\gamma i}$ son factores de inclinación. De igual forma, se afirman las hipótesis de Terzagui, donde $\alpha = 45^\circ + 0.5\phi$, que las líneas de falla son espirales logarítmicas y que se considera la resistencia de las líneas de falla por arriba del desplante por medio de los factores de profundidad (Sordo Zabay, 2013).

Posteriormente a la definición de la capacidad de carga, se diseña la zapata aislada por medio de la formulación de Meyerhof, debido a que dicha formulación permite la inducción de valores afectados por excentricidad en la ecuación por capacidad de carga. Para el diseño de las cimentaciones, se tomó la carga y momentos máximos de diseño. Por ejemplo, para el modelo M183 se consideraron las cargas y momentos máximos con altura de 5m para pilas extremas y 10 m para pilas centrales, con altura de 10m para pilas extremas y 20m para pilas centrales y con altura de 20m para pilas extremas y 40m para pila central, que son las alturas de los modelos de estudio. Para los casos con múltiples pilas por eje, las cargas y momentos máximos se tomaron de igual forma, dependiendo de la altura de las pilas de análisis. Para todos los casos con pila única por eje se propusieron *zapatas aisladas cuadradas*, mientras que para los casos de múltiples pilas se propusieron *zapatas corridas rectangulares*.

Para el modelo M183 se ejemplifica el procedimiento propuesto, para definir las dimensiones y características de los elementos de la cimentación. En este caso, mediante un proceso iterativo se llegó a las dimensiones ideales para las zapatas, que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} B &= 8\text{m} \\ L &= 8\text{m} \\ D_f &= 3\text{m} \end{aligned}$$

Donde B es el ancho de la zapata, L es el largo de la zapata y D_f es el nivel de desplante.

Los valores correspondientes a al ancho y largo efectivos afectados por excentricidad (figura 4.9) son:

$$\begin{aligned} B' &= 6.109 \\ L' &= 7.313, \end{aligned}$$

El factor de capacidad de carga correspondiente al término de sobre carga se tiene que mediante la ecuación 4.7.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + 0.5\phi^\circ) \quad (4.7)$$

Donde N_q es el factor de capacidad de carga correspondiente a la sobre carga del suelo y ϕ es el ángulo de fricción del suelo. Considerando un ángulo de $\phi = 0$, para nuestro modelo de análisis dicho factor es:

$$N_q = 1$$

Por medio de la ecuación 4.8 se determinara el factor de capacidad de carga correspondiente a la cohesión

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \phi} \quad (4.8)$$

$N_c = 5.14$, para $\phi = 0$, por lo que para nuestro caso $N_c = 5.14$.

Para determinar el factor por capacidad de carga correspondiente al término de la fricción se utiliza la ecuación 4.9. Entonces, $N_\gamma = 0$ para el ejemplo propuesto.

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (4.9)$$

Los factores de forma, para los tres términos, por cohesión, sobre carga y fricción, se obtienen mediante las ecuaciones 4.10 a 4.12, los cuales se utilizaron para todos los modelos de análisis tomando en cuenta el ancho con excentricidad B' únicamente en dicho cálculo. El factor de forma correspondiente al primer término se calcula mediante:

$$F_{cs} = 1 + \frac{BN_q}{LN_c} \quad (4.10)$$

Con la cual se obtiene $F_{cs} = 1.149$. El factor de forma correspondiente al segundo término de la ecuación general por capacidad de carga es:

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi \quad (4.11)$$

Con un resultado de $F_{qs} = 1$. Finalmente, el factor de forma correspondiente al tercer término se calcula por medio de:

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (4.12)$$

Obteniéndose $F_{\gamma s} = 0.694$. En la última ecuación $B = B'$

De igual forma, se calcularon los factores de profundidad para cada uno de los términos por cohesión, sobrecarga y fricción. El factor de profundidad correspondiente al primer término de la ecuación general se define mediante la ecuación 4.13.

$$F_{cd} = 1 + 0.4 D_{FB} \quad (4.13)$$

donde: si

$$D_{FB} = \frac{D_f}{B} \quad \text{si} \quad \frac{D_f}{B} \leq 1$$

o

$$D_{FB} = \tan^{-1} \frac{D_f}{B} \text{ si } \frac{D_f}{B} > 1; \text{ Valor en radianes}$$

Por lo que, para nuestro ejemplo se tiene que $F_{cd} = 1.15$. El factor de profundidad correspondiente al segundo término de la ecuación general por capacidad de carga se define con la ecuación 4.14.

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 D_{FB} \quad (4.14)$$

donde:

$$D_{FB} = \frac{D_f}{B} \text{ si } \frac{D_f}{B} \leq 1$$

$$D_{FB} = \tan^{-1} \frac{D_f}{B} \text{ si } \frac{D_f}{B} > 1; \text{ Valor en radianes}$$

Para nuestro modelo de análisis dicho valor es $F_{qd} = 1$. Finalmente, para el tercer valor correspondiente a la fricción el factor de profundidad se utiliza la ecuación 4.15.

$$F_{\gamma d} = 1 \quad (4.15)$$

Para cálculo de los factores de inclinación correspondientes al término de cohesión, sobrecarga y fricción se usan las ecuaciones 4.16 y 4.17. Para nuestro modelo de análisis $F_{ci} = F_{qi} = 1$ y $F_{\gamma i} = 1$.

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 + \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2 \quad (4.16)$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 + \frac{\beta^\circ}{\phi^\circ} \right)^2 \quad (4.17)$$

donde β es la inclinación de la carga con respecto a la vertical.

Las propiedades del suelo se observan en la tabla 3.2 por lo que el cálculo correspondiente a la capacidad de carga última para el modelo de estudio es:

$$q_u = 30.68 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

El factor de reducción que se consideró en los distintos modelos de análisis para suelo duro, suelo intermedio y suelo blando fue de 0.7, mientras que el factor de carga fue de 1.4, por lo que la carga admisible del modelo de análisis es:

$$q_{adm} = 30.68 \cdot 0.7 = 21.48 \frac{ton}{m^2}$$

La carga inducida multiplicada por un factor de carga, tomando en cuenta la excentricidad de dicha carga, se observa en la ecuación 4.18:

$$\sigma_i = \frac{P \cdot F_c}{B' \cdot L'} \quad (4.18)$$

donde: P es la carga máxima de diseño que le llega a la zapata, F_c es el factor de carga, B' es el ancho de la zapata modificado por excentricidad y L' es el largo de la zapata modificado por excentricidad. Por lo tanto, para el ejemplo:

$$\sigma_i = 19.8 \frac{ton}{m^2}$$

$$q_{adm} \geq \sigma_i$$

Entonces, las dimensiones de la sección propuesta pasa por capacidad de carga.

4.3.1.2 Asentamientos

Boussinesq en 1885 demostró que el incremento de esfuerzos no depende del material sino de otros factores. Aunque existen soluciones analíticas para obtener las deformaciones de un semiespacio elástico, las heterogeneidades de las propiedades del suelo con la profundidad invalidan las mismas. Sin embargo, aplicar una distribución de presiones basada en suelo homogéneo a un suelo heterogéneo para obtener los asentamientos es una solución más razonable (Sordo Zabay, 2013). Por lo que, para una cimentación rectangular flexible mediante la solución de Boussinesq y el método por módulo edométrico en un estrato homogéneo, se puede calcular los asentamientos a corto plazo (inmediatos) mediante la ecuación 4.19.

$$\delta_i = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \int_{z_0}^{z_1} q \cdot \sigma_z(z) dz \quad (4.19)$$

donde: ν = Modulo de Poisson del suelo, E = Modulo de elasticidad del suelo, q = presión sobre la cimentación z_0 y z_1 es el inicio y el fin del estrato de análisis. El esfuerzo σ_z se puede obtener mediante la ecuación 4.20:

$$\sigma_z = \frac{1}{4\pi} \cdot \left[\frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{0.5}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{0.5}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right] \quad (4.20)$$

Debido a que si existe un \tan^{-1} que puede dar como resultado un valor negativo, si σ_z en la ecuación 4.10 es negativo se ocupa en su lugar la ecuación 5.21.

$$\sigma_z = \frac{1}{4\pi} \cdot \left[\frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{0.5}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \pi + \tan^{-1} \frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{0.5}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right] \quad (4.21)$$

donde: $m = \frac{B}{z}$; $n = \frac{L}{z}$

Para el modelo de análisis, con la ecuación 4.19 el asentamiento a corto plazo de la cimentación superficial a base de zapata aislada es:

$$\delta_i = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \int_{z_0}^{z_1} q \cdot \sigma_z(z) dz = 0.03 \text{ m}$$

Para obtener el asentamiento a largo plazo, con base en el módulo de compresión volumétrica del suelo se usa la ecuación 4.22.

$$\delta_m = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot m_v \cdot \int_{z_0}^{z_1} q \cdot \sigma_z(z) dz \quad (4.22)$$

donde: m_v = módulo de compresibilidad volumétrica del suelo. Por lo que el asentamiento a largo plazo en una de las esquinas de la cimentación superficial del modelo de análisis es:

$$\delta_m = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot m_v \cdot \int_{z_0}^{z_1} q \cdot \sigma_z(z) dz = 0.7 \text{ m}$$

El máximo asentamiento que permite las NTC-DF 2004 es 0.3 m. Como

$$\delta_m \geq 0.3m$$

La sección propuesta no pasa por asentamientos, es necesario proponer otro tipo de cimentación.

4.3.2 Cimentación profunda

La cimentación profunda propuesta es a base de zapata con pilotes, esto quiere decir que para los puentes con pilas únicas por eje se propuso una zapata aislada con un pilote en cada esquina de la zapata, mientras que para los puentes con múltiples pilas se propuso una zapata corrida de igual manera con un pilote en cada esquina, tal y como se observa en la figura 4.7. La profundidad para todos los pilotes diseñados fue de 30 m, y en todos los casos se propuso un estrato homogéneo con los distintos tipos de suelo propuesto.

Para el ejemplo de análisis M183, las dimensiones iniciales propuestas para la zapata son las siguientes:

$$\begin{aligned} B &= 8\text{m} \\ L &= 8\text{m} \\ D_j &= 3\text{m} \end{aligned}$$

donde B es el ancho de la zapata, L es el largo de la zapata y D_j es el nivel de desplante. El diámetro inicial propuesto para los pilotes es:

$$D = 1.6 \text{ m}$$

4.3.2.1 Eficiencia de los pilotes

La ecuación 4.23 se utiliza para calcular la eficiencia entre pilas o grupo de pilas, para observar si es óptima la distancia que existe entre ellas, debido al bulbo de presiones generado entre pilotes vecinos.

$$\eta = 1 - \left[2 \cdot \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{\pi \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right) \quad (4.23)$$

donde: η es la eficiencia entre pilotes, n_1 es la cantidad de pilotes en la dirección longitudinal, n_2 es la cantidad de pilotes en la dirección transversal, d es la distancia de centro a centro de los pilotes o grupo de pilotes y D es el diámetro de los pilotes.

Por lo que para nuestro modelo de análisis, la eficiencia en la dirección longitudinal es:

$$\eta_l = 1 - \left[2 \cdot \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{\pi \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right) = 0.844$$

y en la dirección transversal es:

$$\eta_t = 1 - \left[2 \cdot \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{\pi \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right) = 0.844$$

El valor es muy cercano a uno, por lo que se considera que tiene muy buena eficiencia entre pilotes.

4.3.2.2 Capacidad de carga

Para el cálculo de capacidad de carga por fricción, mediante la ecuación 4.24 se tiene que:

$$Q_f = \pi \cdot D \cdot h_e \cdot \alpha \cdot c \quad (4.24)$$

donde: D es el diámetro de la pila, h_e es la altura total del estrato, α es un valor empírico para darle un grado de adherencia al material que va de 0.8 a 1, por lo que un valor razonable es 0.9, y c es la propiedad del suelo correspondiente a la cohesión.

Por lo tanto la capacidad de carga por fricción para el modelo de análisis es:

$$Q_f = 687.63 \text{ ton}$$

Para obtener la capacidad de carga por punta se utilizara el método de Jambu, por medio de la ecuación 4.25.

$$Q_p = A_p (cN_c^* + q'N_q^*) \quad (4.25)$$

donde: A_p es el área del pilote, c es la propiedad del suelo correspondiente a la cohesión, q' es el esfuerzo del suelo sobre el pilote, dado por $\gamma \cdot L_p$, y N_c^* y N_q^* son dos valores que dependen del ángulo de fricción del suelo, que se pueden obtener por medio de la figura 4.10.

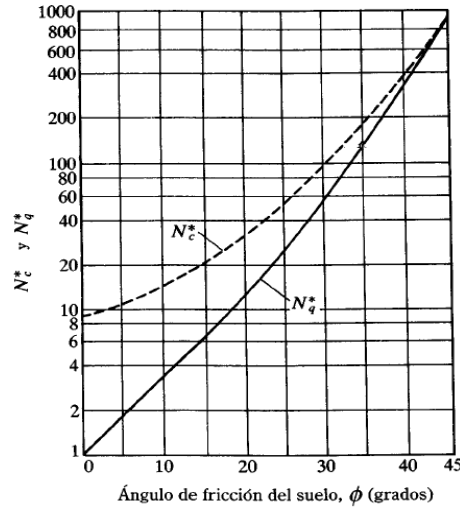


Figura 4.10. Variación de valores máximos N_c^* y N_q^* con el ángulo de fricción del suelo (Meyerhof, 1976)

En el caso de todos los modelos de análisis de esta investigación el ángulo de fricción del suelo ϕ es igual a cero, por lo que:

$$N_c^* = 9$$

$$N_q^* = 0$$

Y la carga por punta mediante el método de Jambu para el modelo de análisis es:

$$Q_p = A_p (cN_c^* + q'N_q^*) = 72.38 \text{ ton}$$

Se puede observar que la carga por fricción es mucho más grande que la carga por punta, esto quiere decir que el pilote está trabajando por fricción y que la contribución de la carga por punta es muy poca o nula. La capacidad de carga total es la suma de la capacidad de carga por fricción más lo que contribuye la capacidad de carga por punta, esto se puede observar en la ecuación 4.26.

$$Q_T = Q_f + Q_p \quad (4.26)$$

Por lo que para nuestro modelo de análisis, la capacidad de carga total es:

$$Q_T = 760.01 \text{ ton}$$

Si se hace la revisión por capacidad de carga, se observa que el valor de la carga axial máxima de diseño que le llega a la cimentación multiplicada por un factor de carga es:

$$Q_c = P \cdot F_c = 741.146 \text{ ton}$$

Por lo que

$$Q_T \geq Q_c$$

Esto quiere decir que la cimentación propuesta pasa por capacidad de carga.

4.3.2.3 Asentamientos

Los asentamientos de la cimentación profunda se calcularon con una solución por diferencias finitas, específicamente mediante el método 2:1, esto quiere decir que dicha pendiente 2:1 se calculó a partir de $2/3$ de la longitud del pilote tal y como lo muestra la figura 4.11.

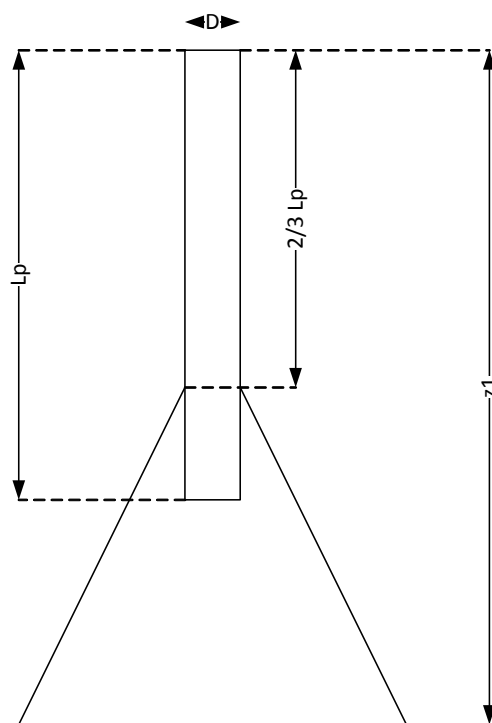


Figura 4.11. Pendiente 2:1 a partir de $2/3$ de la altura del pilote

donde: L_p es la longitud del pilote, D es el diámetro del pilote y z_1 es la altura total del estrato. Dicha pendiente 2:1 se ve con más claridad en la figura 4.12, con las dimensiones que se utilizaron en el modelo de análisis.

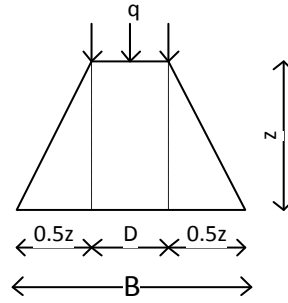


Figura 4.12. Dimensiones propuestas de la pendiente 2:1 de análisis

donde: q es la carga de diseño que le llega al pilote, z es la altura de la pendiente 2:1. D es el diámetro del pilote, B es el ancho de la pendiente 2:1. Por lo que el ancho de la pendiente 2:1 se calcula como:

$$B = D + z$$

El largo de igual forma se obtiene como:

$$L = D + z$$

El área del modelo es:

$$A = B \cdot L$$

La altura media a partir de los 2/3 de la profundidad del pilote donde se calculara el esfuerzo axial promedio es:

$$z_p = \frac{z_1 - \frac{2}{3} L_p}{2} = 9 \text{ m}$$

El esfuerzo axial promedio mediante el método 2:1 es:

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A} = 4.71 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

y para el cálculo del esfuerzo efectivo del modelo de interés se tiene:

$$\sigma_0 = \gamma \cdot d_{af} + \left[(\gamma - \gamma_w) \left(\frac{2}{3} \cdot L_p \right) - d_{af} \right] + (\gamma - \gamma_w) z_p = 9.76 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

donde γ y γ_w son el peso específico del suelo y del agua, respectivamente, y d_{af} es la distancia de la superficie al nivel de aguas freáticas.

El asentamiento para arcillas normalmente consolidadas se puede calcular mediante la ecuación 4.27.

$$S_c = \frac{C_v H_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \quad (4.27)$$

donde: H_c es la máxima altura que recorre el agua, e_0 para arcillas un valor razonable es 7, σ_0 es el esfuerzo efectivo, $\Delta \sigma$ es el esfuerzo axial promedio, y C_v es un coeficiente de consolidación, el cual se puede calcular por medio de la ecuación 4.28.

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (4.28)$$

donde: k es un factor obtenido en laboratorio un valor razonable para arcillas es 10^{-7} , m_v es el módulo de compresibilidad volumétrica y γ_w es el peso específico del agua.

Para nuestro modelo de análisis el asentamiento es:

$$S_c = \frac{C_v H_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} = 3.693 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\delta_c < 0.3m$$

Entonces, la cimentación propuesta pasa por asentamiento.

Siguiendo el procedimiento que se comentó previamente, en la Tabla 4.1 se presentan las propiedades geométricas de las zapatas diseñadas para los modelos analizados con un perfil estratigráfico homogéneo y un suelo blando.

Tabla 4.1. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo blando

Suelo blando		Zapata			Pilotes	
Modelo	Sistema de cimentación	B (m)	L (m)	Df (m)	Lp (m)	D (m)
M170	Zapata aislada con pilotes	10	10	3	30	2.8
M171	Zapata aislada con pilotes	12	12	3	30	3.2
M172	Zapata corrida con pilotes	8	13	4	30	3
M173	Zapata aislada con pilotes	10	10	3	30	2.8
M174	Zapata aislada con pilotes	12	12	3	30	3.2
M175	Zapata aislada con pilotes	16	16	3.5	30	5.6
M176	Zapata corrida con pilotes	8	13	4	30	3
M177	Zapata corrida con pilotes	12	17	3.5	30	4.5
M178	Zapata aislada con pilotes	10	10	3	30	2.8
M179	Zapata aislada con pilotes	12	12	3	30	3.2
M180	Zapata aislada con pilotes	16	16	3.5	30	5.6
M181	Zapata corrida con pilotes	8	13	4	30	3
M182	Zapata corrida con pilotes	12	17	3.5	30	4.5

B es el ancho de la zapata, L es el largo de la zapata, Df es el nivel de desplante, Lp es la longitud total de los pilotes y D es el diámetro de los pilotes

Las propiedades geométricas de las zapatas y pilotes diseñados para los modelos analizados con un perfil estratigráfico homogéneo y suelo intermedio y suelo duro se presentan en las Tablas 4.2 y 4.3, respectivamente.

Tabla 4.2. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo intermedio

Suelo intermedio		Zapata			Pilotes	
Modelo	Sistema de cimentación	B (m)	L (m)	Df (m)	Lp (m)	D (m)
M183	Zapata aislada con pilotes	8	8	3	30	1.6
M184	Zapata aislada con pilotes	9.5	9.5	3	30	2
M185	Zapata corrida con pilotes	7	10	3	30	1.8
M186	Zapata aislada con pilotes	8	8	3	30	1.6
M187	Zapata aislada con pilotes	9.5	9.5	3	30	2
M188	Zapata aislada con pilotes	12.5	12.5	3	30	3.4
M189	Zapata corrida con pilotes	7	10	3	30	1.8
M190	Zapata corrida con pilotes	9.5	15	3	30	2.8
M191	Zapata aislada con pilotes	8	8	3	30	1.6
M192	Zapata aislada con pilotes	9.5	9.5	3	30	2
M193	Zapata aislada con pilotes	12.5	12.5	3	30	3.4
M194	Zapata corrida con pilotes	7	10	3	30	1.8
M195	Zapata corrida con pilotes	9.5	15	3	30	2.8

B es el ancho de la zapata, L es el largo de la zapata, Df es el nivel de desplante, Lp es la longitud total de los pilotes y D es el diámetro de los pilotes

Tabla 4.3. Propiedades geométricas de los modelos diseñados para suelo duro

Suelo duro		Zapata		
Modelo	Sistema de cimentación	B (m)	L (m)	Df (m)
M196	Zapata aislada	5.5	5.5	2
M197	Zapata aislada	7	7	2
M198	Zapata corrida	4	10	2
M199	Zapata aislada	5.5	5.5	2
M200	Zapata aislada	7	7	2
M201	Zapata aislada	9	9	2.5
M202	Zapata corrida	4	10	2
M203	Zapata corrida	6.5	10	2.5
M204	Zapata aislada	5.5	5.5	2
M205	Zapata aislada	7	7	2
M206	Zapata aislada	9	9	2.5
M207	Zapata corrida	4	10	2
M208	Zapata corrida	6.5	10	2.5

B es el ancho de la zapata, L es el largo de la zapata y Df es el nivel de desplante

Como nota importante los diagramas de interacción de las pilas centrales y extremas en su dirección longitudinal y transversal para todos los modelos de análisis se muestran en el “Apéndice B” de este trabajo de investigación.

5 CAPÍTULO 5. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL

Mediante análisis estáticos no lineales (SAP2000) se obtuvieron las curvas de capacidad de los modelos de estudio M001 a M208, esto quiere decir que mediante la obtención de las curvas de capacidad para los límites de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso propuestos por el FEMA 356, se obtuvieron las ductilidades de cada uno de los modelos de análisis bajo los distintos parámetros propuestos en este trabajo de investigación.

5.1 Definición de ductilidad

La capacidad a ductilidad de las pilas del puente de los modelos en estudio, se define como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento a la primera fluencia, como se observa en la ecuación 5.1.

$$\mu = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (5.1)$$

donde:

μ = Ductilidad

Δ_{\max} = Desplazamiento máximo o último

Δ_y = Desplazamiento de fluencia

Para definir la capacidad a ductilidad de los modelos realizados en este trabajo de investigación, se tiene que el desplazamiento de fluencia se asocia a la primera fluencia de la estructura en su conjunto. Por su parte, el desplazamiento máximo de la ecuación 5.1 se definió como aquel relacionado con la máxima rotación del elemento más crítico donde se desarrolla la primera articulación plástica, esto quiere decir que se tomaron en cuenta los niveles de desempeño para columnas de concreto reforzado que propone FEMA 356, los cuales se muestran en la tabla 5.1, en dicha tabla, se puede observar, que la rotación máxima generada para las columnas, depende de los niveles de carga axial, Cuantía de acero transversal y fuerza cortante de las columnas de concreto reforzado, esto quiere decir que mediante el diseño de las articulaciones plásticas representados por niveles de carga axial, confinamiento transversal y fuerza cortante presentes en cada modelo de estudio, se seleccionaron las rotaciones máximas, tal y como se muestra en la tabla 5.1, para un nivel de desempeño de seguridad de vida *LS* y de prevención de colapso *CP*.

Tabla 5.1. Nivel de desempeño para columnas de concreto reforzado FEMA 356

$\frac{P}{A_g f'_c}$	Refuerzo Transversal	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Nivel de desempeño	
			LS	CP
≤ 0.1	C	≤ 3	0.015	0.02
≤ 0.1	C	≥ 6	0.012	0.016
≥ 0.4	C	≤ 3	0.012	0.015
≥ 0.4	C	≥ 6	0.01	0.012
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.005	0.006
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.004	0.005
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.002	0.003
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.002

C y NC son un buen y un mal acero transversal, respectivamente
 LS es un nivel de desempeño de seguridad de vida,
 CP es un nivel de desempeño de prevención de colapso

En la figura 5.1 se muestran las primeras articulaciones plásticas generadas en las pilas para todos los modelos de estudio, por medio de un análisis estático no lineal. La explicación del porque se articulan primero las pilas de los extremos es que, las pilas del puente, para todos los parámetros propuestos, tienen una variación entre alturas de 0.5, esto quiere decir que la pila central tiene el doble de altura que las pilas de los extremos, por lo que, las pilas de los extremos son menos esbeltas y al ser elementos menos flexibles o más rígidas, inducen una falla por cortante, por lo que en dichas pilas se presentara la primer articulación plástica en la zona donde se genera el máximo momento. Para la obtención de los límites de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, previamente se diseñaron las articulaciones plásticas de las pilas donde se generaba la primera articulación plástica (pilas extremas), para posteriormente mediante las rotaciones propuestas por el fema 356 (tabla 5.1) obtener los desplazamientos máximos para los límites de desempeño propuestos en este trabajo de investigación.

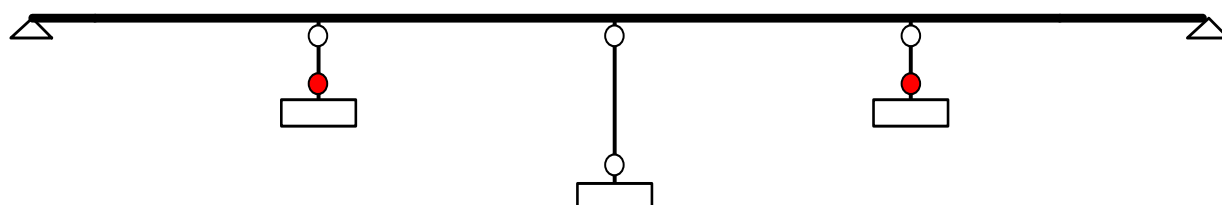


Figura 5.1. Modelo de análisis para todas los casos de estudio.

Durante el diseño de las articulaciones plásticas y la obtención de los diagramas de interacción de las pilas de concreto reforzado, no se consideraron los factores de reducción de resistencia, que marcan los códigos de diseño, esto quiere decir que el factor de reducción de resistencia para las revisiones por carga axial y por cortante es igual a uno, debido a que esto simula más la realidad del comportamiento de la estructura.

La influencia del concreto y del acero longitudinal, se le imprimió a las pilas por medio del diagrama de interacción impuesto a las articulaciones plásticas, esto quiere decir que la cuantía de acero longitudinal que se le asignó a todos los modelos de estudio, fue por medio de las articulaciones plásticas. Todos los diagramas de interacción propuestos en esta investigación para todas las pilas de los modelos de análisis, fueron obtenidos a través de la herramienta *Section Designer* del programa de análisis estructural SAP2000, con un *modelo constitutivo de Mander no confinado*.

5.1.1 Revisión por cortante

En la ecuación 5.2 se observa la revisión por cortante que se tiene que realizar a columnas de concreto reforzado para la obtención de la rotación plástica, para los límites de desempeño propuestos (FEMA 356).

$$\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'c}} \quad (5.2)$$

donde:

V = cortante de la pila de análisis, b_w = ancho de la sección transversal de la pila, d = peralte efectivo de la pila y $f'c$ = esfuerzo a compresión del concreto.

La fuerza cortante V se puede obtener por medio de una relación entre el momento plástico de la sección de análisis y la longitud de la pila, como lo muestra la ecuación 5.3.

$$V = \frac{M_p}{L} \quad (5.3)$$

donde:

M_p = momento de fluencia obtenido del diagrama de interacción y L = Longitud de la pila de estudio. En la figura 5.2 se muestra un diagrama de interacción esquemático, donde se observa de donde se obtiene el valor de M_p para todos los modelos de análisis.

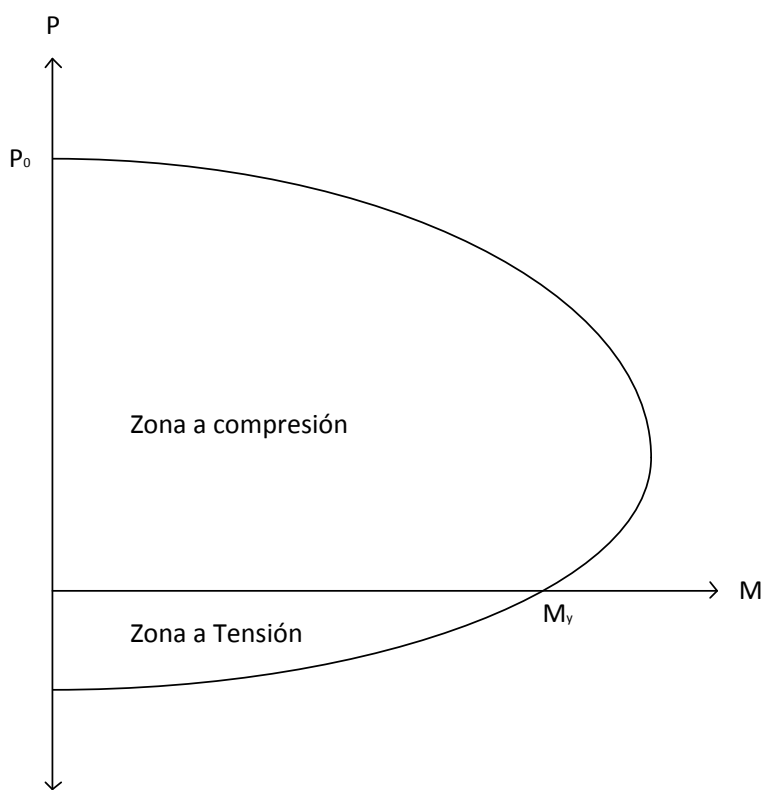


Figura 5.2. Diagrama de interacción característico de las pilas de concreto reforzado

5.1.1.1 Dirección longitudinal

Debido a que las ecuaciones propuestas por el FEMA 356 para diseñar las articulaciones plásticas se hicieron con base en el sistema inglés, se optó por realizar todos los cálculos bajo dicho sistema de unidades. Entonces, por ejemplo, para el modelo de análisis M131 en su dirección longitudinal se definió su diagrama de interacción en la dirección longitudinal, el cual se muestra en la figura 5.3, en unidades del sistema internacional.

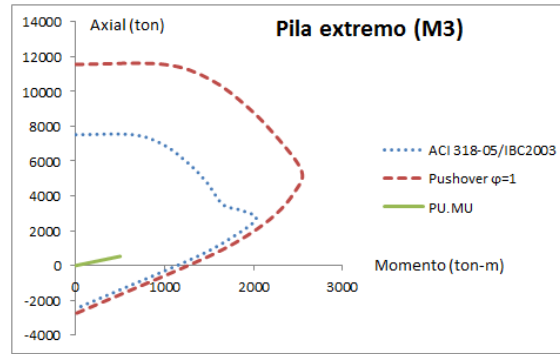


Figura 5.3. Diagrama de interacción del modelo M131 en la dirección longitudinal de análisis.

Debido a que las ecuaciones propuestas por el FEMA 356 se realizaron en unidades inglesas, se decidió hacer todos los cálculos correspondientes al diseño de las articulaciones plásticas en dicho sistema de unidades.

Del diagrama de la Figura 5.3 convertida a unidades del sistema inglés para el modelo M131 se obtuvo:

$$M_p = 75\,735\,993 \text{ lb in}$$

la longitud de la pila extremo en unidades del sistema inglés es:

$$L = 196.85 \text{ in}$$

por lo que para la pila en estudio se definió que la fuerza cortante es de:

$$V = \frac{M_p}{L} = 384\,739.62 \text{ lb}$$

el valor correspondiente al ancho de la sección por el peralte efectivo es:

$$b_w \cdot d = 157.48 \cdot 37.4 = 5\,890.01 \text{ in}^2$$

y el valor correspondiente al esfuerzo a compresión multiplicado por un factor de sobre resistencia del concreto del 10% es:

$$f'_c = 5\,475.97 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

Entonces, de la ecuación 5.2 se obtiene el valor correspondiente a la revisión por cortante de:

$$\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} = 0.88$$

que es menor a 3, por lo que no será necesario interpolar linealmente para obtener el valor de la rotación correspondiente al límite de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso.

5.1.1.2 Dirección transversal

En la figura 5.4 se muestra el diagrama de interacción correspondiente a la dirección transversal de análisis, para el mismo modelo de estudio, el modelo M131. A partir de esta figura, siguiendo el mismo procedimiento se define:

$$M_p = 240\,800\,000 \text{ lb in}$$

$$L = 196.85 \text{ in}$$

$$V = \frac{M_p}{L} = 1\,223\,266.45 \text{ lb}$$

$$b_w \cdot d = 6\,122.51 \text{ in}^2$$

$$f'_c = 5\,475.97 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} = 2.7$$

Por lo que $2.7 \leq 3$ y tampoco es necesario interpolar linealmente.

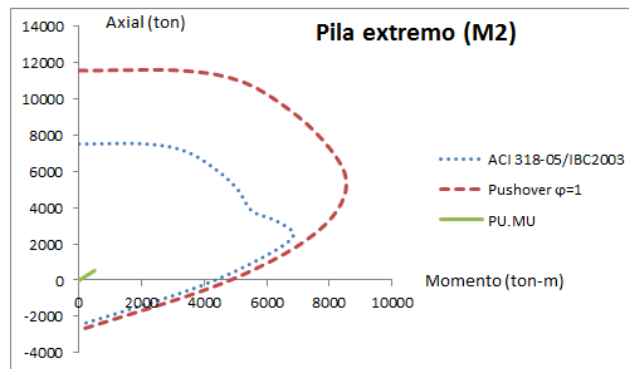


Figura 5.4. Diagrama de interacción del modelo M131 en la dirección transversal de análisis.

5.1.2 Revisión por carga axial

Para obtener las rotaciones en los límites de desempeño a evaluar además de realizar una revisión a cortante también se tiene que hacer una revisión a carga axial mediante la ecuación 5.4. Si el valor calculado con esta ecuación se encuentra entre 0.1 y 0.4, se interpolará linealmente para obtener las rotaciones de las pilas de concreto reforzado que recomienda el FEMA 356. Al igual que en la revisión por cortante, las unidades utilizadas para esta revisión son las unidades inglesas por las razones explicadas en párrafos anteriores.

$$\frac{P}{A_g \cdot f'_c} \quad (5.4)$$

donde:

P = carga axial de diseño de la pila de análisis

A_g = área gruesa de la sección

f'_c = Esfuerzo a compresión del concreto

Para la ejemplificación de la revisión por carga axial se utilizara el mismo modelo de análisis que en la revisión por cortante, el modelo M131. Si tomamos los efectos biaxiales representados en los diagramas de interacción de las figuras 5.3 y 5.4, para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, obtenemos que la carga a compresión máxima del concreto es:

$$P_0 = 25\,498\,403.6 \text{ lb}$$

A partir de la ecuación 3.3, para tomar en cuenta los efectos biaxiales, la cual se repite por conveniencia, se tiene:

$$\frac{1}{P_{ni}} = \frac{1}{P_{nx}} + \frac{1}{P_{ny}} - \frac{1}{P_0} \quad (5.5)$$

Como todos los puentes de estudio son isostáticos, el momento en la parte superior de la columna es cero, existe una articulación en ese punto, y la excentricidad en ambas direcciones es igual a cero, por lo que se tiene:

$$e_x = e_y = 0$$

Entonces, si obtenemos las cargas en la dirección longitudinal y la dirección transversal donde la excentricidad es igual a cero.

$$P_{nx} = P_0 = 25\,498\,403.6 \text{ lb}$$

$$P_{ny} = P_0 = 25\,498\,403.6 \text{ lb}$$

Por lo que:

$$\frac{1}{P_{ni}} = \frac{1}{25\,498\,403.6} + \frac{1}{25\,498\,403.6} - \frac{1}{25\,498\,403.6} = \frac{1}{25\,498\,403.6}$$

$$P_{ni} = 25\,498\,403.6 \text{ lb}$$

Además, el área gruesa de la sección de análisis es:

$$A_g = 6\,200.01 \text{ in}^2$$

y el esfuerzo a compresión del concreto es:

$$f'_c = 5\,475.97 \frac{lb}{in^2}$$

Por lo que de la ecuación 5.4 se obtiene el valor para la revisión por carga axial del FEMA 356, el cual es:

$$\frac{P}{A_g \cdot f'_c} = \frac{25498403.6}{6200.01 \cdot 5475.97} = 0.75$$

Como $0.75 \geq 0.4$, no es necesario interpolar linealmente.

Las rotaciones para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso utilizadas para el modelo M131, con columnas de concreto reforzado para un grado de buen (C) y mal (NC) refuerzo transversal se muestran resaltadas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Nivel de desempeño para columnas de concreto reforzado FEMA 356 del modelo M131. Para un buen y mal o nulo confinamiento transversal

$\frac{P}{A_g f'_c}$	Refuerzo Transversal	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Nivel de desempeño	
			LS	CP
≤ 0.1	C	≤ 3	0.015	0.02
≤ 0.1	C	≥ 6	0.012	0.016
≥ 0.4	C	≤ 3	0.012	0.015
≥ 0.4	C	≥ 6	0.01	0.012
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.005	0.006
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.004	0.005
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.002	0.003
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.002	0.003
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.002

5.2 Rotaciones calculadas para los modelos de análisis

Las mismas revisiones fueron realizadas para los modelos M001 a M208, con sus respectivas propiedades y parámetros propuestos. En esta sección se presentan los valores obtenidos para las revisiones por carga axial, por cortante y confinamiento transversal, Además de las rotaciones propuestas por el FEMA 356 conforme a los cálculos realizados, para obtener los límites de seguridad de vida y prevención de colapso en la dirección longitudinal y transversal, para todos los modelos de análisis.

Tabla 5.3. Rotaciones calculadas para los modelos de análisis, propuestos por el FEMA 356.

			Revisiones			Rotaciones FEMA 356			
Modelos de análisis			$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$		Longitudinal		Transversal	
Modelo	Acero Longitudinal	Acero Transversal	Carga axial	Longitudinal	Transversal	LS	CP	LS	CP
M001	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.14	3.01	8.87	0.002	0.003	0.002	0.002
M002	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.14	1.51	4.43	0.002	0.003	0.002	0.003
M003	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.19	1.67	4.97	0.002	0.003	0.002	0.003
M004	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	2.98	4.84	0.002	0.003	0.002	0.002
M005	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	1.49	2.42	0.002	0.003	0.002	0.003
M006	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.04	1.10	1.66	0.002	0.003	0.002	0.003
M007	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	2.98	4.84	0.002	0.003	0.002	0.002
M008	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	0.75	1.21	0.002	0.003	0.002	0.003
M009	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	2.55	2.55	0.002	0.003	0.002	0.003
M010	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	1.27	1.27	0.002	0.003	0.002	0.003
M011	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	0.77	0.77	0.002	0.003	0.002	0.003
M012	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	2.55	2.55	0.002	0.003	0.002	0.003
M013	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	0.64	0.64	0.002	0.003	0.002	0.003
M014	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.82	0.97	3.00	0.002	0.003	0.002	0.003
M015	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.82	0.48	1.50	0.002	0.003	0.002	0.003
M016	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.97	0.95	2.90	0.002	0.003	0.002	0.003
M017	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.84	1.18	1.97	0.002	0.003	0.002	0.003
M018	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.84	0.59	0.99	0.002	0.003	0.002	0.003
M019	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.82	0.43	0.69	0.002	0.003	0.002	0.003
M020	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.84	1.18	1.97	0.002	0.003	0.002	0.003
M021	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.84	0.29	0.49	0.002	0.003	0.002	0.003
M022	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.98	1.49	1.49	0.002	0.003	0.002	0.003
M023	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.98	0.75	0.75	0.002	0.003	0.002	0.003
M024	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.96	0.54	0.54	0.002	0.003	0.002	0.003
M025	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.98	1.49	1.49	0.002	0.003	0.002	0.003
M026	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.98	0.37	0.37	0.002	0.003	0.002	0.003
M027	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	0.52	1.65	0.002	0.003	0.002	0.003
M028	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	0.26	0.82	0.002	0.003	0.002	0.003
M029	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.25	0.77	0.002	0.003	0.002	0.003
M030	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.74	0.45	0.78	0.002	0.003	0.002	0.003
M031	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.74	0.22	0.39	0.002	0.003	0.002	0.003
M032	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.72	0.13	0.21	0.002	0.003	0.002	0.003
M033	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.74	0.45	0.78	0.002	0.003	0.002	0.003
M034	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.74	0.11	0.19	0.002	0.003	0.002	0.003
M035	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.39	0.39	0.002	0.003	0.002	0.003
M036	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.20	0.20	0.002	0.003	0.002	0.003
M037	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.73	0.12	0.12	0.002	0.003	0.002	0.003
M038	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.39	0.39	0.002	0.003	0.002	0.003
M039	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.10	0.10	0.002	0.003	0.002	0.003
M040	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.14	3.01	8.87	0.015	0.010	0.012	0.012
M041	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.14	1.51	4.43	0.015	0.011	0.014	0.012
M042	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.19	1.67	4.97	0.015	0.011	0.013	0.012
M043	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	2.98	4.84	0.015	0.011	0.013	0.012
M044	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	1.49	2.42	0.015	0.012	0.015	0.012

		Revisiones				Rotaciones FEMA 356				
Modelos de análisis		$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$			Longitudinal		Transversal		
Modelo	Acero	Longitudinal	Acero Transversal	Carga axial	Longitudinal	Transversal	LS	CP	LS	CP
M045	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.04	1.10	1.66	0.015	0.012	0.015	0.012	
M046	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	2.98	4.84	0.015	0.011	0.013	0.012	
M047	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	0.75	1.21	0.015	0.012	0.015	0.012	
M048	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.20	2.55	2.55	0.015	0.012	0.015	0.012	
M049	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.20	1.27	1.27	0.015	0.012	0.015	0.012	
M050	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	0.77	0.77	0.015	0.012	0.015	0.012	
M051	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.20	2.55	2.55	0.015	0.012	0.015	0.012	
M052	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.20	0.64	0.64	0.015	0.012	0.015	0.012	
M053	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.82	0.97	3.00	0.012	0.015	0.012	0.015	
M054	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.82	0.48	1.50	0.012	0.015	0.012	0.015	
M055	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.97	0.95	2.90	0.012	0.015	0.012	0.015	
M056	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.84	1.18	1.97	0.012	0.015	0.012	0.015	
M057	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.84	0.59	0.99	0.012	0.015	0.012	0.015	
M058	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.82	0.43	0.69	0.012	0.015	0.012	0.015	
M059	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.84	1.18	1.97	0.012	0.015	0.012	0.015	
M060	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.84	0.29	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015	
M061	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.98	1.49	1.49	0.012	0.015	0.012	0.015	
M062	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.98	0.75	0.75	0.012	0.015	0.012	0.015	
M063	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.96	0.54	0.54	0.012	0.015	0.012	0.015	
M064	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.98	1.49	1.49	0.012	0.015	0.012	0.015	
M065	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.98	0.37	0.37	0.012	0.015	0.012	0.015	
M066	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.52	1.65	0.012	0.015	0.012	0.015	
M067	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.26	0.82	0.012	0.015	0.012	0.015	
M068	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.25	0.77	0.012	0.015	0.012	0.015	
M069	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.45	0.78	0.012	0.015	0.012	0.015	
M070	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.22	0.39	0.012	0.015	0.012	0.015	
M071	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.72	0.13	0.21	0.012	0.015	0.012	0.015	
M072	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.45	0.78	0.012	0.015	0.012	0.015	
M073	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.11	0.19	0.012	0.015	0.012	0.015	
M074	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.39	0.39	0.012	0.015	0.012	0.015	
M075	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.20	0.20	0.012	0.015	0.012	0.015	
M076	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.73	0.12	0.12	0.012	0.015	0.012	0.015	
M077	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.39	0.39	0.012	0.015	0.012	0.015	
M078	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.10	0.10	0.012	0.015	0.012	0.015	
M079	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.14	3.01	8.87	0.002	0.003	0.002	0.002	
M080	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.14	1.51	4.43	0.002	0.003	0.002	0.003	
M081	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.19	1.67	4.97	0.002	0.003	0.002	0.003	
M082	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	2.98	4.84	0.002	0.003	0.002	0.002	
M083	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	1.49	2.42	0.002	0.003	0.002	0.003	
M084	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.04	1.10	1.66	0.002	0.003	0.002	0.003	
M085	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	2.98	4.84	0.002	0.003	0.002	0.002	
M086	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	0.75	1.21	0.002	0.003	0.002	0.003	
M087	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	2.55	2.55	0.002	0.003	0.002	0.003	
M088	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	1.27	1.27	0.002	0.003	0.002	0.003	
M089	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.09	0.77	0.77	0.002	0.003	0.002	0.003	
M090	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	2.55	2.55	0.002	0.003	0.002	0.003	
M091	Sobre reforzado	Mal confinamiento NC	1.20	0.64	0.64	0.002	0.003	0.002	0.003	
M092	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.88	2.70	0.002	0.003	0.002	0.003	
M093	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.75	0.44	1.35	0.002	0.003	0.002	0.003	
M094	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.88	0.86	2.59	0.002	0.003	0.002	0.003	
M095	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	1.06	1.77	0.002	0.003	0.002	0.003	
M096	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	0.53	0.88	0.002	0.003	0.002	0.003	
M097	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.74	0.39	0.62	0.002	0.003	0.002	0.003	
M098	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	1.06	1.77	0.002	0.003	0.002	0.003	
M099	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.76	0.27	0.44	0.002	0.003	0.002	0.003	

			Revisiones			Rotaciones FEMA 356			
Modelos de análisis			$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$		Longitudinal		Transversal	
Modelo	Acero Longitudinal	Acero Transversal	Carga axial	Longitudinal	Transversal	LS	CP	LS	CP
M100	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.89	1.33	1.33	0.002	0.003	0.002	0.003
M101	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.89	0.66	0.66	0.002	0.003	0.002	0.003
M102	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.88	0.49	0.49	0.002	0.003	0.002	0.003
M103	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.89	1.33	1.33	0.002	0.003	0.002	0.003
M104	Buen refuerzo	Mal confinamiento NC	0.89	0.33	0.33	0.002	0.003	0.002	0.003
M105	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.48	1.50	0.002	0.003	0.002	0.003
M106	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.24	0.75	0.002	0.003	0.002	0.003
M107	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.68	0.23	0.70	0.002	0.003	0.002	0.003
M108	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.67	0.41	0.71	0.002	0.003	0.002	0.003
M109	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.67	0.21	0.35	0.002	0.003	0.002	0.003
M110	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.65	0.12	0.19	0.002	0.003	0.002	0.003
M111	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.67	0.41	0.71	0.002	0.003	0.002	0.003
M112	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.67	0.10	0.18	0.002	0.003	0.002	0.003
M113	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.36	0.36	0.002	0.003	0.002	0.003
M114	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.18	0.18	0.002	0.003	0.002	0.003
M115	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.67	0.11	0.11	0.002	0.003	0.002	0.003
M116	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.36	0.36	0.002	0.003	0.002	0.003
M117	Escaso refuerzo	Mal confinamiento NC	0.69	0.09	0.09	0.002	0.003	0.002	0.003
M118	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.04	2.67	7.89	0.012	0.015	0.010	0.012
M119	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.04	1.33	3.94	0.012	0.015	0.011	0.014
M120	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.09	1.48	4.42	0.012	0.015	0.011	0.014
M121	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.99	2.64	4.29	0.012	0.015	0.011	0.014
M122	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.99	1.32	2.15	0.012	0.015	0.012	0.015
M123	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.94	0.98	1.48	0.012	0.015	0.012	0.015
M124	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.99	2.64	4.29	0.012	0.015	0.012	0.014
M125	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.99	0.66	1.07	0.012	0.015	0.012	0.015
M126	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.10	2.26	2.26	0.012	0.015	0.012	0.015
M127	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.10	1.13	1.13	0.012	0.015	0.012	0.015
M128	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	0.99	0.69	0.69	0.012	0.015	0.012	0.015
M129	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.10	2.26	2.26	0.012	0.015	0.012	0.015
M130	Sobre reforzado	Buen confinamiento C	1.10	0.57	0.57	0.012	0.015	0.012	0.015
M131	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.88	2.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M132	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.44	1.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M133	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.86	2.59	0.012	0.015	0.012	0.015
M134	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M135	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.53	0.88	0.012	0.015	0.012	0.015
M136	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.39	0.62	0.012	0.015	0.012	0.015
M137	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M138	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.27	0.44	0.012	0.015	0.012	0.015
M139	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M140	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.66	0.66	0.012	0.015	0.012	0.015
M141	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.49	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015
M142	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M143	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.33	0.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M144	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.48	1.50	0.012	0.015	0.012	0.015
M145	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.24	0.75	0.012	0.015	0.012	0.015
M146	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.68	0.23	0.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M147	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.67	0.41	0.71	0.012	0.015	0.012	0.015
M148	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.67	0.21	0.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M149	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.65	0.12	0.19	0.012	0.015	0.012	0.015
M150	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.67	0.41	0.71	0.012	0.015	0.012	0.015
M151	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.67	0.10	0.18	0.012	0.015	0.012	0.015
M152	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.36	0.36	0.012	0.015	0.012	0.015
M153	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.18	0.18	0.012	0.015	0.012	0.015
M154	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.67	0.11	0.11	0.012	0.015	0.012	0.015

			Revisiones			Rotaciones FEMA 356			
Modelos de análisis			$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$		Longitudinal		Transversal	
Modelo	Acero Longitudinal	Acero Transversal	Carga axial	Longitudinal	Transversal	LS	CP	LS	CP
M155	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.36	0.36	0.012	0.015	0.012	0.015
M156	Escaso refuerzo	Buen confinamiento C	0.69	0.09	0.09	0.012	0.015	0.012	0.015
M157	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.88	2.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M158	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.44	1.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M159	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.86	2.59	0.012	0.015	0.012	0.015
M160	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M161	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.53	0.88	0.012	0.015	0.012	0.015
M162	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.39	0.62	0.012	0.015	0.012	0.015
M163	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M164	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.27	0.44	0.012	0.015	0.012	0.015
M165	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M166	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.66	0.66	0.012	0.015	0.012	0.015
M167	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.49	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015
M168	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M169	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.33	0.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M170	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.88	2.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M171	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.44	1.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M172	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.86	2.59	0.012	0.015	0.012	0.015
M173	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M174	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.53	0.88	0.012	0.015	0.012	0.015
M175	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.39	0.62	0.012	0.015	0.012	0.015
M176	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M177	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.27	0.44	0.012	0.015	0.012	0.015
M178	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M179	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.66	0.66	0.012	0.015	0.012	0.015
M180	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.49	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015
M181	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M182	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.33	0.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M183	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.88	2.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M184	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.44	1.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M185	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.86	2.59	0.012	0.015	0.012	0.015
M186	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M187	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.53	0.88	0.012	0.015	0.012	0.015
M188	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.39	0.62	0.012	0.015	0.012	0.015
M189	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M190	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.27	0.44	0.012	0.015	0.012	0.015
M191	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M192	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.66	0.66	0.012	0.015	0.012	0.015
M193	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.49	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015
M194	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M195	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.33	0.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M196	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.88	2.70	0.012	0.015	0.012	0.015
M197	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.75	0.44	1.35	0.012	0.015	0.012	0.015
M198	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.86	2.59	0.012	0.015	0.012	0.015
M199	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M200	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.53	0.88	0.012	0.015	0.012	0.015
M201	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.74	0.39	0.62	0.012	0.015	0.012	0.015
M202	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	1.06	1.77	0.012	0.015	0.012	0.015
M203	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.76	0.27	0.44	0.012	0.015	0.012	0.015
M204	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M205	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.66	0.66	0.012	0.015	0.012	0.015
M206	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.88	0.49	0.49	0.012	0.015	0.012	0.015
M207	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	1.33	1.33	0.012	0.015	0.012	0.015
M208	Buen refuerzo	Buen confinamiento C	0.89	0.33	0.33	0.012	0.015	0.012	0.015

C y NC son un buen y un mal confinamiento de acero transversal respectivamente, LS es un nivel de desempeño de seguridad de vida, y CP es un nivel de desempeño de prevención de colapso.

5.3 Modelado de las articulaciones plásticas

A los modelos M001a M208, se les realizó un análisis estático no lineal (Pushover) mediante el programa de análisis estructural SAP2000, para así obtener la curva de capacidad e imponerle las rotaciones calculadas a cada modelo, con las rotaciones que recomienda el FEMA 356 para columnas de concreto reforzado y así obtener los desplazamientos necesarios de cada uno de los modelos de análisis. En la figura 5.5 se observa un modelo típico de esta investigación en SAP2000, el cual representa el modelado de todos los puentes analizados con los distintos parámetros descritos en este trabajo.

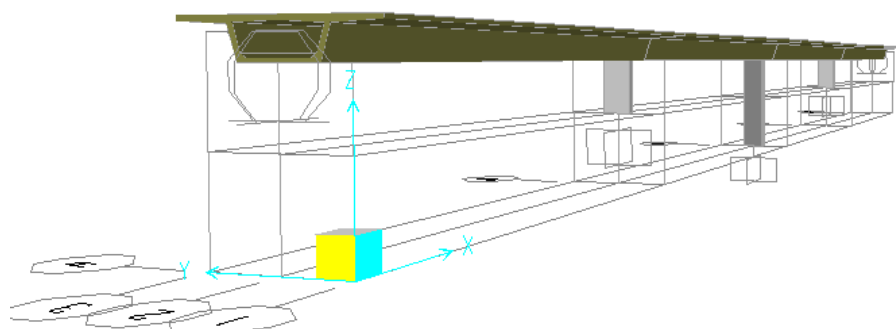


Figura 5.5. Modelo representativo en SAP2000

5.3.1 Asignación de las cargas para el análisis estático no lineal

Las cargas asignadas para el análisis estático no lineal fueron en el centro de la viga del puente con un valor de cinco toneladas en las dos direcciones de análisis tal y como lo muestra la figura 5.6.

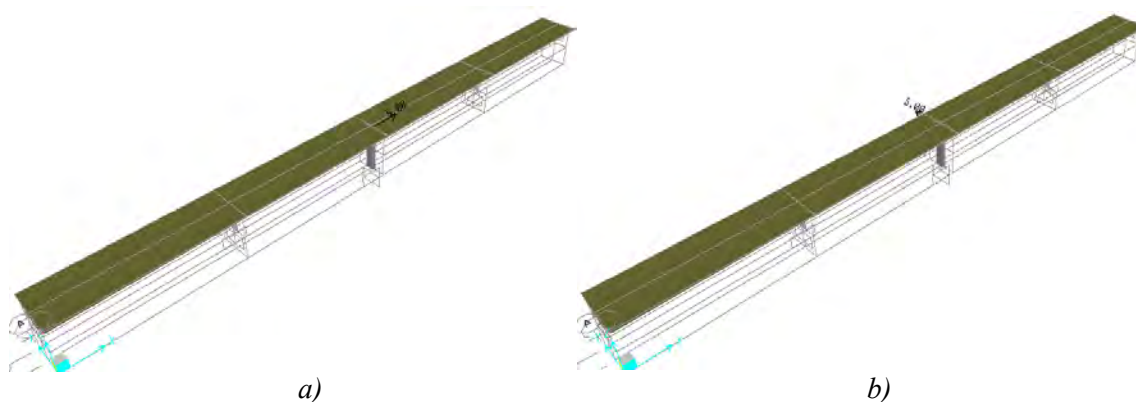


Figura 5.6. Carga impuesta en las direcciones longitudinal y transversal para el análisis estático no lineal. a)Px, b)Py

5.3.2 Casos de carga

Los casos de carga para los modelos M001 a M208, se le propuso una condición de carga inicial únicamente por peso propio, además de asignarle la carga lateral de cinco toneladas en las dos direcciones para el posterior análisis estático no lineal de los puentes de estudio. En la figura 5.7 se presenta la condición de carga inicial utilizada en los modelos sin considerar los efectos $P-\Delta$, dichos efectos se tomaron en cuenta en los modelos con este parámetro, por medio de las propiedades geométricas no lineales en los casos de carga del Sap2000 (activando la condición P-Delta en Geometric Nonlinearty

Parameters). En la figura 5.8 se presenta el caso de carga, para el análisis estático no lineal en la dirección transversal de análisis (sin tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$).

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: DEAD Set Def Name Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Initial Conditions:

- ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case []

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case.

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1
Load Pattern	DEAD	1

Add Modify Delete

Other Parameters:

Load Application: Full Load Modify/Show...

Results Saved: Final State Only Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

OK Cancel

Figura 5.7. Asignación de la no linealidad para el caso de carga inicial para todos los modelos de análisis sin efectos $P-\Delta$.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Py Set Def Name Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Initial Conditions:

- ☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☒ Continue from State at End of Nonlinear Case DEAD

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case.

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	Py	1
Load Pattern	Py	1

Add Modify Delete

Other Parameters:

Load Application: Displ Control Modify/Show...

Results Saved: Multiple States Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

OK Cancel

Figura 5.8. Asignación de la no linealidad para el caso de carga lateral para todos los modelos de análisis sin efectos $P-\Delta$.

5.3.3 Inclusión de las articulaciones plásticas a los modelos de análisis

El acero longitudinal y transversal se asignó a las rotaciones por medio del diagrama de interacción de cada una de las pilas, para todos los modelos de análisis, con un factor de reducción de resistencia igual a uno, para tener una consideración más real de los materiales propuestos en todos los casos de estudio, bajo los diferentes parámetros introducidos en la investigación. En la figura 5.9 se observa cómo se modelaron las articulaciones plásticas de las pilas extremas y centrales en su dirección longitudinal y transversal respectivamente, mediante el diagrama de interacción. Dichas articulaciones plásticas se asignan a las pilas en cada uno de sus extremos, como lo muestra la figura 5.10, a una distancia del 5 % del extremo en el nodo de interés, debido a que si se elige exactamente donde se encuentra el nodo, al ser muy rígido, puede ocasionar problemas, por esta razón se elige a una distancia lo más cercana posible al nodo. En el SAP, estas articulaciones se asignan como se muestra en la figura 5.9. El mismo procedimiento se hizo para los múltiples modelos de análisis para las pilas de los extremos y las pilas centrales de los puentes de estudio.

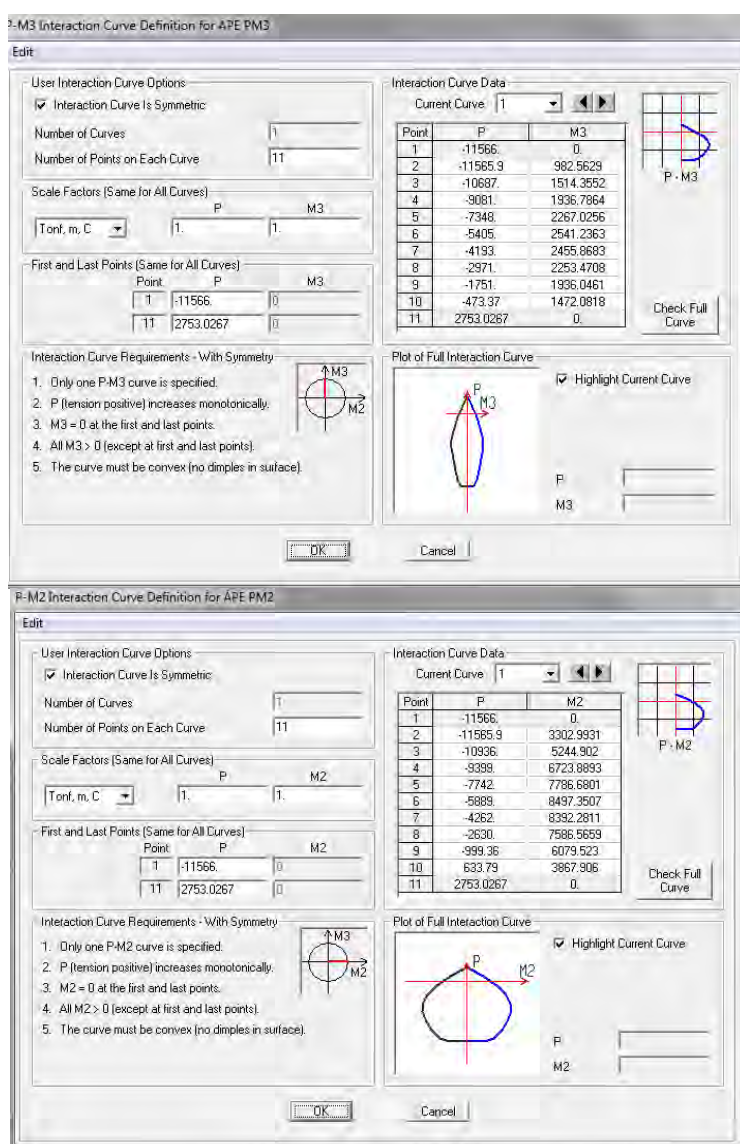


Figura 5.9. Articulaciones plásticas asignadas a las pilas del puente en su dirección longitudinal y transversal

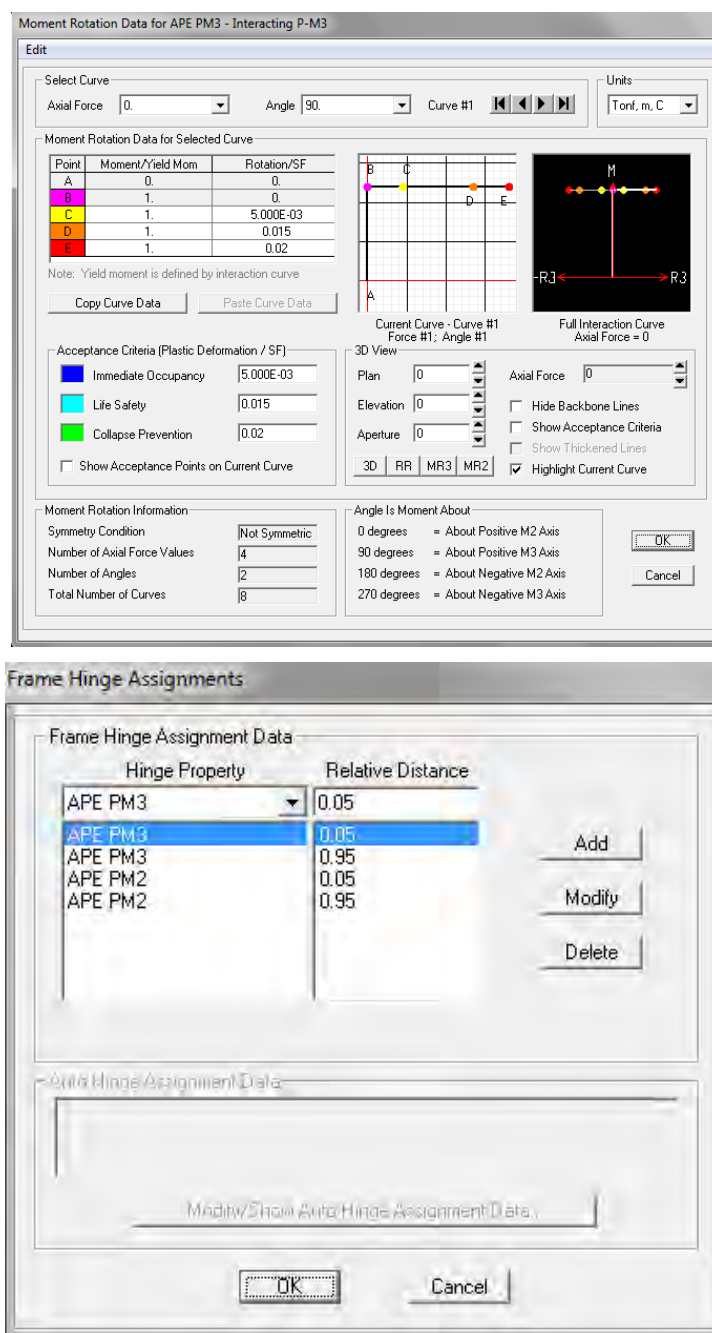


Figura 5.10. Modelado y asignación de las articulaciones plásticas a las pilas de los puentes de estudio.

5.4 Interacción suelo estructura.

Para los modelos con interacción suelo estructura con los tres tipos de suelo propuestos; suelo duro, suelo intermedio y suelo blando, se procedió a diseñar la cimentación realizando una revisión por capacidad de carga y por asentamiento tal y como se explicó en el capítulo 4, para así obtener las dimensiones de la cimentación para cada uno de los modelos de análisis, para esto se usaron las propiedades del suelo que se mostraron en la tabla 3.2. Posteriormente, mediante el programa DYNA 6.1 se obtuvieron las funciones de impedancia para los grados de libertad traslacional y rotacional de los modelos de interés.

Cabe resaltar que al realizar análisis estáticos no lineales, para obtener las curvas de capacidad de los múltiples modelos de análisis, solo se tomó en consideración la parte real de la función de impedancia. Esto quiere decir que no se tomó en consideración la parte imaginaria que se relaciona con el amortiguamiento efectivo de la función de impedancia, solo se consideró la rigidez efectiva para todos los casos con interacción suelo estructura con un amortiguamiento crítico del 5%. La rigidez efectiva de los distintos modelos de análisis se definió conforme lo estipulan las Normas Técnicas Complementarias (NTC-DF, 2004), mediante de un proceso iterativo que busca que el periodo efectivo calculado con la ecuación A.20 del reglamento, sea similar al periodo fundamental de la estructura, analizado en base empotrada.

5.4.1 Funciones de impedancia

Las funciones de impedancia se calcularon mediante el programa DYNA 6.1 con las propiedades del suelo y geométricas de los modelos de estudio con interacción suelo estructura, en donde solo se obtuvo la parte real (rigidez) de la función, debido a que se realizó un análisis estático no lineal. Con estas funciones se obtiene la influencia del tipo de suelo en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes en esta investigación.

Los periodos fundamentales de la estructura en base empotrada de los modelos de análisis, se muestran en la tabla 5.4, donde dicho periodo fundamental, se ocupó como el periodo inicial, y mediante un proceso iterativo se obtuvo el periodo fundamental modificado por interacción suelo estructura, para posteriormente obtener la parte real de la función (Rigidez); con la que, por medio de resortes traslacionales y rotacionales en la base, se modelaron los puentes de estudio con interacción suelo estructura.

Tabla 5.4. Periodos de los modelos de análisis en base empotrada

Base empotrada	
Modelo	T (seg)
M131	0.498
M132	1.451
M133	1.134
M134	0.550
M135	1.578
M136	1.887
M137	0.330
M138	3.025
M139	0.426
M140	1.203
M141	1.305
M142	0.254
M143	2.257

En la figura 5.11 se indican las funciones de impedancia, traslacional horizontal, de la parte real de la función, para una cimentación superficial a base de zapata aislada, obtenida con el programa DYNA 6.1, para múltiples frecuencias.

Las funciones de impedancia de todos los modelos de análisis se obtuvieron de manera separada (cimentación superficial y cimentación profunda), esto quiere decir que primero se obtuvo la parte real de la función de impedancia de la cimentación superficial y de manera separada se obtuvo la parte real de la función de impedancia de los pilotes de cimentación, para estos últimos tomando en cuenta los efectos de grupo y sin tomar en cuenta la influencia de la cimentación superficial. Obteniendo los dos valores

correspondientes a la función de impedancia de la parte real de las zapatas y la parte real de los pilotes por separado, para posteriormente sumar dichos valores, en las cimentaciones a base de zapatas y pilotes de cimentación, los cuales se utilizaron para determinar las rigideces efectivas traslacionales y rotacionales que se le impusieron a los resortes de los modelos de análisis.

5.4.2 Cálculo de las rigideces efectivas del suelo

Para obtener la rigidez efectiva traslacional y rotacional del suelo de estudio, conforme a las normas NTC-DF 2004, se lleva el periodo fundamental de la estructura a un periodo modificado por interacción suelo estructura, mediante un proceso iterativo. Se observa lo anteriormente descrito mediante el modelo de análisis M183, donde se obtuvo la rigidez traslacional y rotacional efectivas modificados por interacción suelo estructura.

En la figura 5.12 se esquematizan los amortiguadores y rigideces equivalentes que representan las condiciones del suelo y que se utilizaron en los modelos de estudio con interacción suelo estructura, donde por las razones ya explicadas solo se tomó en consideración la parte real de la función de impedancia.

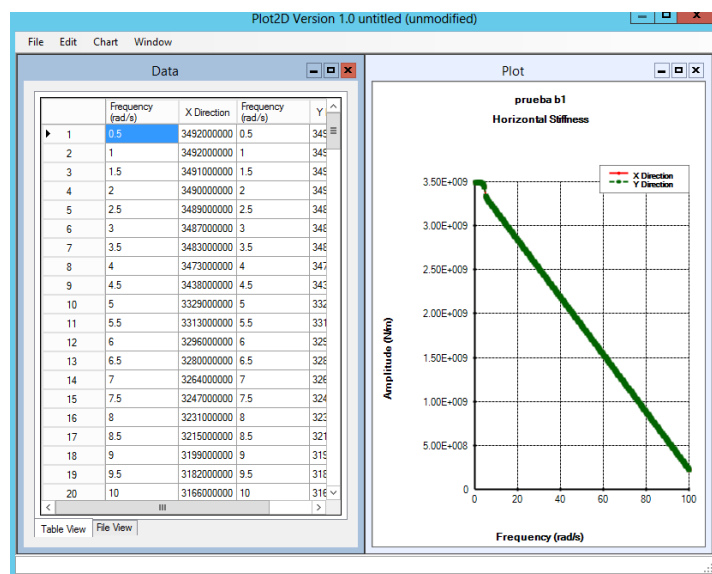


Figura 5.11. Función de impedancia, traslacional horizontal, obtenida con el programa DYNA 6.1 para múltiples frecuencias (Valores en rad/seg y Newton)

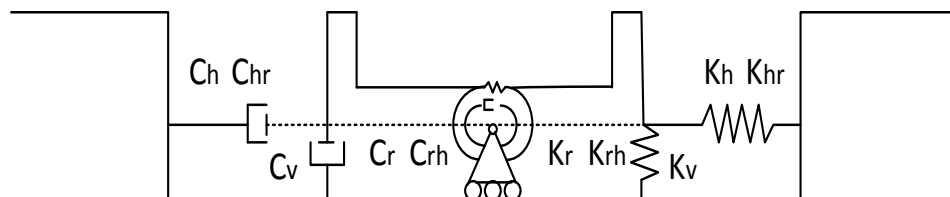


Figura 5.12. Resortes y amortiguadores equivalentes del suelo (Fernández y Avilés, 2008)

Para el cálculo de las rigideces efectivas con que se modelo el suelo por medio de resortes traslacionales y rotacionales, se tiene que:

$$W_e = 18479232.45 \text{ N}$$

$$H_e = 10 \text{ m}$$

$$T_e = 0.498 \text{ seg}$$

$$D_j = 3 \text{ m}$$

donde W_e es el peso total de la estructura, H_e es la altura de la estructura T_e es el periodo fundamental de la estructura y D_j es el nivel de desplante de la cimentación.

La parte real de la función de impedancia de la cimentación superficial, obtenida con el programa DYNA 6.1 con el periodo inicial es:

$$K_x = 2897544000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{rx} = 93633520000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_y = 2897544000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{ry} = 93633520000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_v = 3724772000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

donde K_x y K_y es la rigidez traslacional horizontal en la dirección de análisis, K_{rx} y K_{ry} es la rigidez rotacional en la dirección de análisis y K_v es la rigidez traslacional vertical.

Para la parte real de la función de impedancia de la cimentación profunda (pilotes) calculada con el programa DYNA 6.1, con el periodo inicial, se tiene que:

$$K_x = 2359000000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{rx} = 2.02686\text{E}+11 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_y = 2359000000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{ry} = 2.02686\text{E}+11 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_v = 5139088000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La parte real de la función de impedancia, es la suma de la parte real de la cimentación superficial (zapatas) más la parte real de la cimentación profunda (pilotes), como se muestra a continuación.

$$K_{total} = K_{zapata} + K_{pilotes}$$

La parte real de la función de impedancia tiene que ser la de todo el sistema estructural, debido a que en los datos iniciales se está tomando el peso total de la estructura (puente) y el periodo fundamental de la estructura, por lo que la rigidez total debe ser multiplicada por tres, ya que cada pila tiene su cimentación propia a base de zapata con pilotes para suelo blando e intermedio y únicamente zapata para suelo duro y en total son tres pilas del puente, por lo que.

$$K_x = (2897544000 + 2359000000) \cdot 3 = 15769632000 \frac{N}{m}$$

$$K_{rx} = (93633520000 + 2.02686E+11) \cdot 3 = 888958560000 \frac{N}{m}$$

$$K_y = (2897544000 + 2359000000) \cdot 3 = 15769632000 \frac{N}{m}$$

$$K_{ry} = (93633520000 + 2.02686E+11) \cdot 3 = 888958560000 \frac{N}{m}$$

$$K_v = (3724772000 + 5139088000) \cdot 3 = 26591580000 \frac{N}{m}$$

El periodo de traslación horizontal en la dirección de análisis, para la obtención de la rigidez efectiva del sistema estructural, se obtiene mediante la ecuación 5.6.

$$T_n = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{K_n \cdot g}{W_e}}} \quad (5.6)$$

donde: T_n es el periodo traslacional horizontal en la dirección de análisis, K_n es la rigidez traslacional horizontal en la dirección de análisis obtenida de la función de impedancia, g es el valor correspondiente a la gravedad y W_e es el peso total de la estructura.

Para el modelo de análisis M183 en la dirección longitudinal se tiene:

$$T_x = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{K_x \cdot g}{W_e}}} = 0.069 \text{ seg}$$

y en la dirección transversal:

$$T_y = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{K_y \cdot g}{W_e}}} = 0.069 \text{ seg}$$

El periodo rotacional en la dirección de análisis se calcula mediante la ecuación 5.7.

$$T_r = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\frac{W_e (H_e + D_f)^2}{K_r}} \quad (5.7)$$

donde: T_r es el periodo rotacional en la dirección de análisis, K_r es la rigidez rotacional en la dirección de análisis obtenida de la función de impedancia, g es el valor correspondiente a la gravedad, W_e es el peso total de la estructura y H_e es la altura de la estructura.

Por lo que para la dirección longitudinal se tiene que:

$$T_{rx} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\frac{W_e (H_e + D_f)^2}{K_{rx}}} = 0.119 \text{ seg}$$

y en la dirección transversal es:

$$T_{ry} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\frac{W_e (H_e + D_f)^2}{K_{ry}}} = 0.119 \text{ seg}$$

Para obtener el periodo modificado por interacción suelo estructura se usa la ecuación 5.8, la cual se puede encontrar en las NTC-DF.

$$T_e = \sqrt{T_e^2 + T_x^2 + T_r^2} \quad (5.8)$$

Por lo que, para el modelo de análisis se tiene que:

$$T_{ex} = T_{ey} = \sqrt{T_e^2 + T_x^2 + T_r^2} = 0.517 \text{ seg}$$

Se tiene que hacer un proceso iterativo hasta que el periodo modificado con interacción suelo estructura converja, en el momento que suceda, las rigideces traslacionales y rotacionales obtenidas con el nuevo periodo son las que se toman para el modelado de los resortes simulando la acción del suelo sobre la estructura y así obtener la influencia de la ductilidad en las pilas con distintos tipos de suelo. El mismo proceso se le aplico a cada uno de los modelos de estudio con interacción suelo estructura, para los distintos tipos de suelo.

5.4.3 Modelado de los resortes

Para el modelado de los resortes que simulan la influencia del suelo sobre la estructura, en el programa de análisis estructural SAP2000, se procedió a quitar cada uno de los apoyos empotrados de todas las pilas del puente, para que por medio de elementos *Spring* del SAP2000 simular la rigidez, traslacional y rotacional del suelo, tal y como se muestra en la figura 5.13.

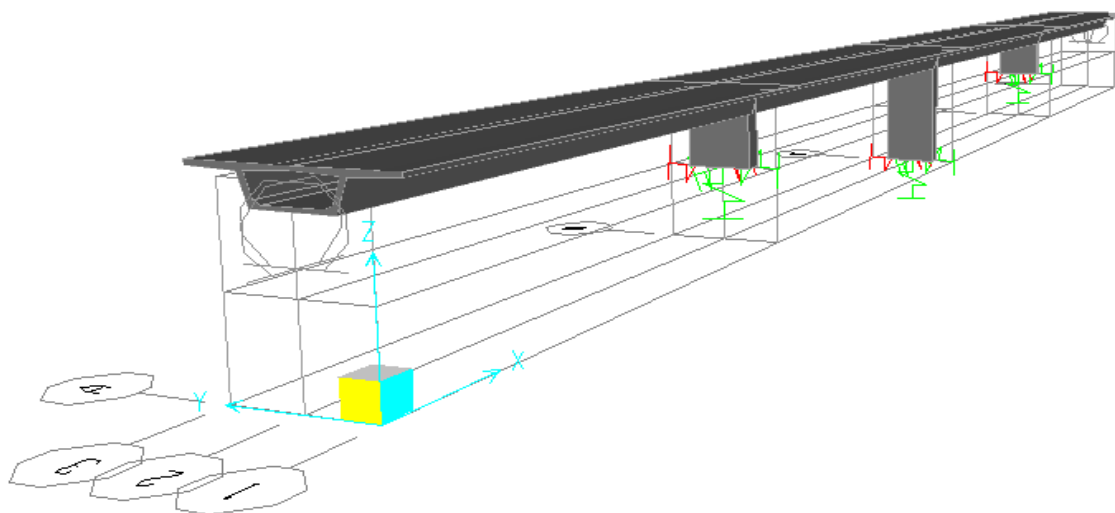


Figura 5.13. Resortes del modelo de análisis M183.

En las figuras 5.14 y 5.15 se muestran las rigideces de los resortes del modelo de estudio, con los que se obtuvo la influencia del suelo sobre el puente carretero común.

Object Model - Point Information

Location Assignments Loads

Identification

Label 1

Constraints	None
Restraint	None
Local Axes	Default
Springs	
Coordinate System	GLOBAL
UX	5.256E+09
UY	5.256E+09
UZ	8.864E+09
RX	2.969E+11
RY	2.969E+11
Masses	None
Panel Zone	None
Joint Patterns	None
Group	ALL
Generalized Displs	None
RS Named Sets	None
Plot Functions	None
Merge Number	0

N, m, C

Reset All

Update Display

Modify Display

OK

Cancel

Double click white background cell to edit item.

Figura 5.14. Rigidez traslacional y rotacional del modelo de análisis con interacción suelo estructura para el modelo M183.

Joint Springs

Spring Direction
Coordinate System: GLOBAL

Spring Stiffness
Translation Global X: 5256388000
Translation Global Y: 5256388000
Translation Global Z: 8863860000
Rotation about Global X: 296859040000
Rotation about Global Y: 296859040000
Rotation about Global Z: 0.

Options
☐ Add to Existing Springs
☒ Replace Existing Springs
☐ Delete Existing Springs

Advanced...
OK Cancel

Figura 5.15. Rigidez traslacional y rotacional, modelado mediante elementos Spring del SAP2000 para el modelo M183.

Posteriormente al modelado de los resortes para todos los modelos de estudio, se procedió a obtener la curva de capacidad y así poder observar la influencia del tipo de suelo en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes para su posterior comparación de resultados con los modelos en base empotrada.

Las curvas de capacidad obtenidas mediante el análisis estático no lineal para los modelos M001 a M208 se pueden encontrar en el Apéndice A, de este trabajo de investigación.

6 CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para entender el comportamiento de una estructura, se tiene que comprender la curva de capacidad del modelo de estudio. En este trabajo se utilizara la curva de capacidad de cada modelo, para analizar los resultados de cada uno de los parámetros propuestos en esta investigación. En la figura 6.1 se muestra la curva de capacidad propuesta por el FEMA 356, la cual fue implementada en todos y cada uno de los modelos de estudio. En esta figura se observa que la primer pendiente A-B muestra la rigidez del sistema, el punto B muestra la resistencia del sistema y la pendiente post-fluencia B-C indica la capacidad de deformación del sistema. Incluso el FEMA 356 es conservador y eso se observa en los puntos C-D-E de la curva de capacidad propuesta, donde se observa que el sistema se puede deformar un poco más, antes de llegar al colapso.

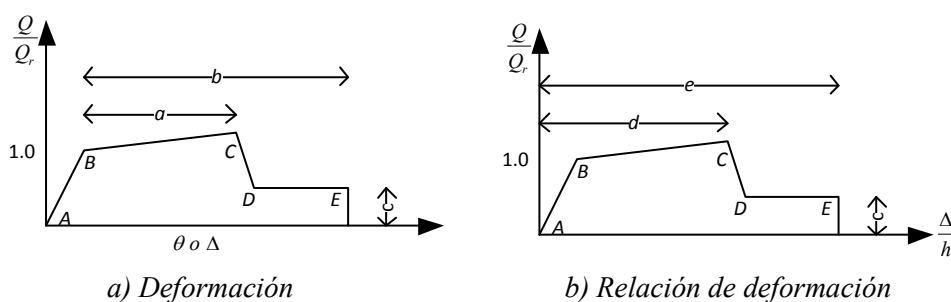


Figura 6.1. Curva de capacidad para componentes o elementos de concreto reforzado (FEMA 356), a) Deformación y b) Relación de deformación

Mediante la curva de capacidad obtenida con un análisis estático no lineal o pushover se procedió a registrar cada una de las ductilidades para los diferentes modelos de análisis con los límites de desempeño calculados conforme al FEMA 356, para así entender las repercusiones en la ductilidad de las estructuras de análisis, esto quiere decir que se obtuvo la ductilidad, por medio de la relación del desplazamiento último para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, entre el desplazamiento a la primer fluencia, de todas las estructuras de puentes carreteros comunes de estudio. La comprensión de los distintos niveles de ductilidad alcanzados para todos los modelos de estudio, bajo los diferentes parámetros impuestos, dará un panorama más amplio de los factores de ductilidad que se le deben de otorgar a las pilas de puentes carreteros comunes, para llevarlos al rango no lineal y así obtener mejores diseños de pilas de puentes.

La calibración de los modelos de análisis se dio por medio de la obtención de la curva de capacidad en los programas de análisis estructural SAP2000 y Midas civil, esto quiere decir que en ambos software se modeló, el mismo puente carretero común, con las mismas propiedades de materiales, los mismos elementos estructurales y bajo las mismas consideraciones y propiedades, para así mediante un análisis estático no lineal obtener las curvas de capacidad con ambos programas de análisis estructural, para una posterior comparación de curvas de capacidad. El modelo de estudio que se eligió para este proceso fue el modelo M055 por lo que en la figura 6.2 se observa una comparación de curvas de capacidad mediante los programas de análisis estructural SAP2000 y Midas civil, con las mismas consideraciones en ambos software, en su dirección longitudinal y transversal de análisis. Por su parte, en la figura 6.3 se observa una comparación de curvas de capacidad del modelo M054, con los programas de análisis SAP2000 y Midas civil además de la obtención de la curva de capacidad de manera manual, esto quiere decir que además de obtener las curvas de capacidad por medio de los software antes mencionados también se realizó un análisis estático no lineal matricial a mano para una mejor concepción de la no linealidad de los puentes de estudio, en donde para un caso realizado a mano, se tomaron los elementos estructurales con rigidez axial infinita y para el otro caso realizado a mano, se tomó la viga infinitamente rígida para un puente monolítico.

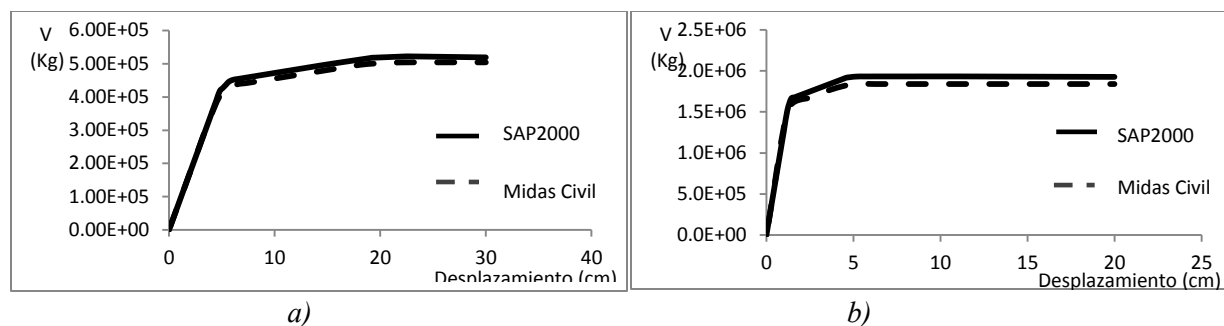


Figura 6.2. Curva de capacidad del modelo de análisis M055 mediante el software SAP2000 (línea continua) y Midas civil (línea discontinua) para: a) dirección longitudinal, b) dirección transversal.

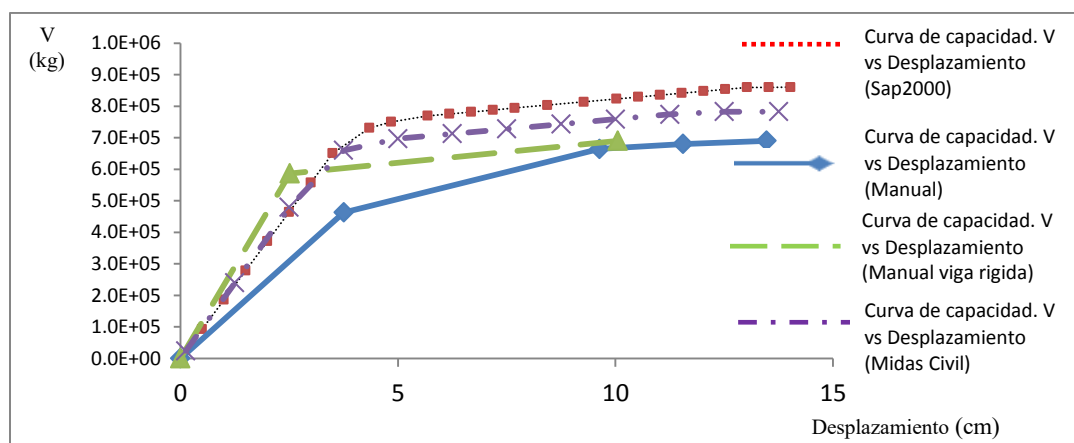


Figura 6.3. Curva de capacidad del modelo de análisis M054 en su dirección longitudinal mediante el software SAP2000, Midas civil, a mano con rigidez axial infinita y a mano con viga rígida.

Se puede observar mediante la figura 6.2 y 6.3 que existe una variación menor al 5% en las curvas de capacidad con ambos software (SAP2000 y Midas civil), esto debido, a que la forma en que se mete el diagrama de interacción, en el diseño de las articulaciones plásticas de las pilas, no es la misma en ambos software de análisis y debido a esto puede existir esta pequeña variación. Para los modelos realizados a mano se hicieron muchas simplificaciones, por esta razón puede existir una variación más significativa, por lo que teniendo esto en consideración y habiendo calibrado los modelos, se procedió a realizar los análisis correspondientes para todos los parámetros propuestos en esta investigación únicamente con el programa de análisis estructural SAP2000.

El análisis de resultados en la obtención de las ductilidades, bajo los distintos parámetros propuestos en esta investigación se presenta a continuación:

- Variación de altura entre pilas
- Número de pilas por eje
- Forma de la sección transversal
- Cuantía de acero longitudinal
- Nivel de acero transversal
- Rigidez efectiva
- Efectos $P-\Delta$
- Interacción suelo estructura

En las próximas secciones se comenta la influencia de estos parámetros en la capacidad de ductilidad en las dos direcciones de análisis de los puentes de estudio. Para esto, se comparan las respuestas obtenidas en algunos modelos, con características similares, pero con la variación del parámetro de análisis. Al final del capítulo se presentan las ductilidades obtenidas para todos los modelos de estudio.

6.1 Variación de altura de las pilas

Un parámetro destacado en esta investigación es la influencia de la variación de las alturas de pilas de puentes carreteros en la ductilidad que éstas desarrollan. Como se comentó previamente, en los modelos propuestos la altura de las pilas extremas es 0.5 veces la altura de la pila central, con alturas de pilas que van desde cinco metros hasta cuarenta metros. En la figura 6.4 se observan las curvas de capacidad de los modelos con sección tipo muro, buena cuantía de acero longitudinal y transversal, con la sección agrietada, una pila única por eje y sin tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$ y sin tomar en cuenta la interacción suelo estructura. Los dos modelos analizados a continuación solo son representativos de los múltiples modelos que se analizaron en esta investigación bajo este parámetro. La diferencia entre las dos curvas de capacidad que se observan en la figura 6.4, es que el modelo M132 tiene el doble de altura en pilas, con respecto al puente del modelo M131. En esta dicha figura 6.4 se realiza una comparación de las curvas de capacidad de los dos modelos de estudio.

Obtenidas las curvas de capacidad de los modelos de estudio, mediante un análisis estático no lineal, se procedió a establecer los desplazamientos últimos, por medio de los niveles de desempeño para un límite de seguridad de vida y de prevención de colapso, mediante de las rotaciones que recomienda el FEMA 356, tal y como se observa en las figuras 6.5 y 6.6 respectivamente.

Si se realiza un análisis más detallado, por medio la curva de capacidad se observa que para el puente con pilas de menor longitud (M131) su rigidez y resistencia son mayores, pero se desplaza menos, con respecto al puente con mayor altura de pilas y por lo tanto más flexible (M132), para los dos niveles de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso. Además, se observa que el desplazamiento de fluencia es mayor para el modelo con pilas de mayor longitud que para el modelo con pilas de menor altura, esto quiere decir que la relación del desplazamiento último entre el desplazamiento a la primer fluencia o también llamada ductilidad, es mayor para el modelo con pilas de menor altura que para el modelo con pilas de mayor altura, tal y como se observa en la tabla 6.1.

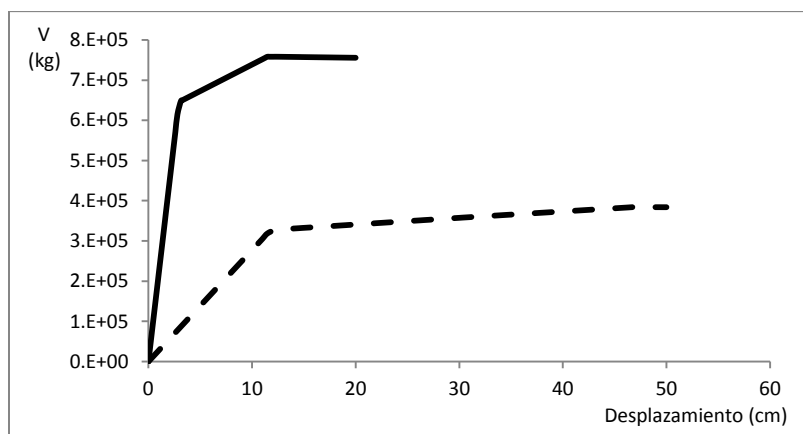


Figura 6.4. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea continua) y M132 (línea discontinua) en la dirección longitudinal

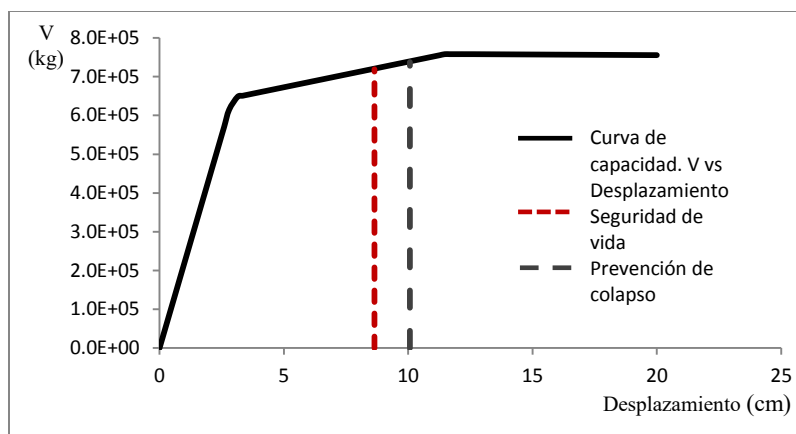


Figura 6.5. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 en la dirección longitudinal

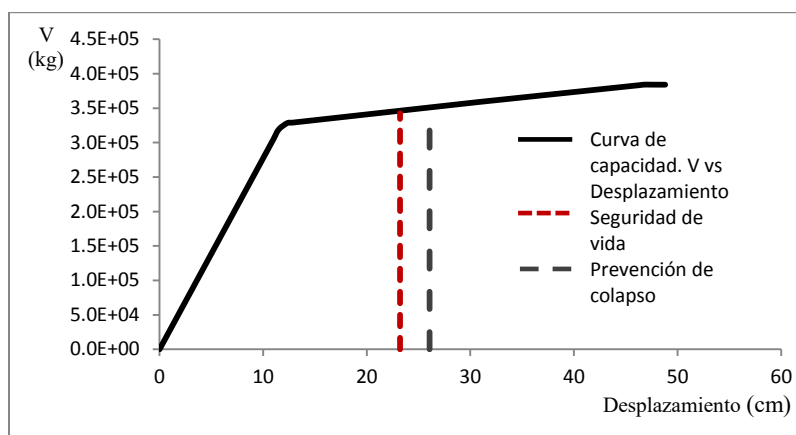


Figura 6.6. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132 en la dirección longitudinal

Tabla 6.1. Ductilidades obtenidas para los modelos de análisis en la dirección longitudinal.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M131	3.14	8.64	2.75	10.07	3.21
M132	12.30	23.21	1.89	26.07	2.12

Realizando el mismo análisis, a los mismos modelos pero ahora en su dirección transversal de análisis, se observa una tendencia similar que en el caso longitudinal, pero con la diferencia de que las ductilidades obtenidas en la dirección transversal son mayores, tal y como se observa en la tabla 6.2, esto quiere decir que una de las tendencias en todos los modelos de estudio en la dirección transversal es que los desplazamientos últimos para los límites de desempeño de seguridad de vida y prevención de colapso son menores que para los desplazamientos en su dirección longitudinal, lo anteriormente explicado se puede observar más fácilmente en las figuras 6.8 y 6.9, en donde se presentan los desplazamientos últimos para

los límites de desempeño de estudio, mientras que en la figura 6.7 se realiza una comparación de curvas de capacidad para los modelos M131 y M132 en su dirección transversal de análisis.

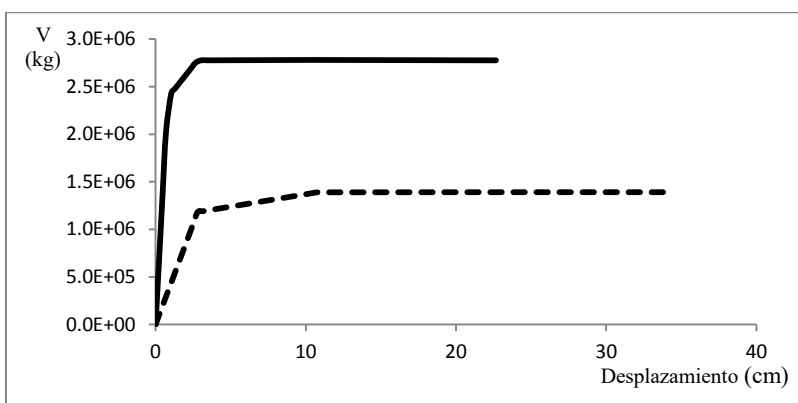


Figura 6.7. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea continua) y M132 (línea discontinua) en la dirección transversal

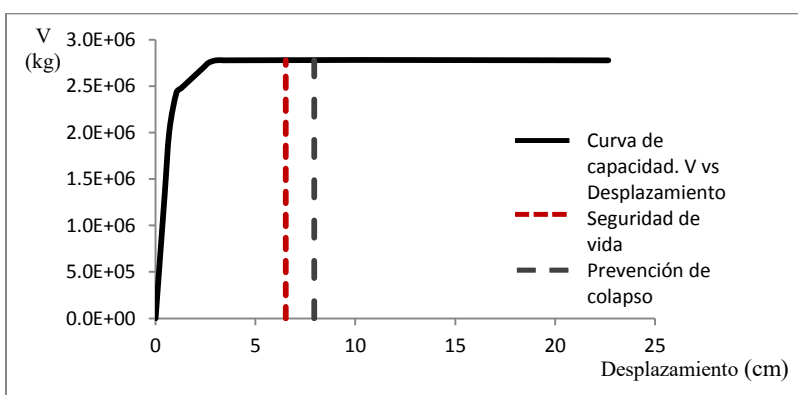


Figura 6.8. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 en la dirección transversal

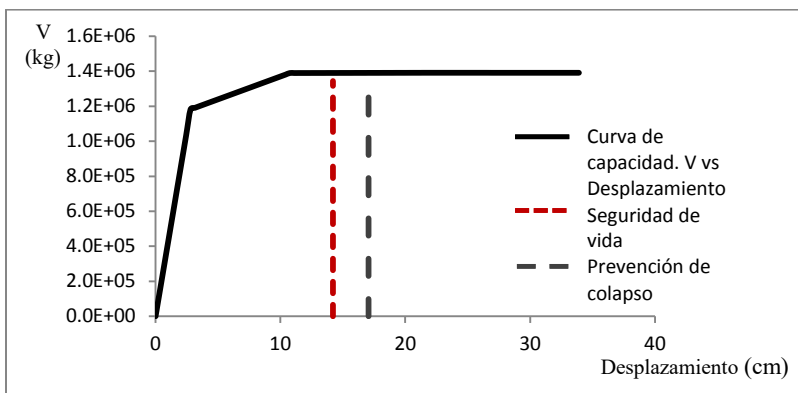


Figura 6.9. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132 en la dirección transversal.

. *Tabla 6.2. Ductilidades obtenidas para los modelos de análisis en la dirección transversal.*

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M131	1.05	6.52	6.23	7.94	7.60
M132	2.80	14.21	5.07	17.06	6.09

6.2 Número de pilas por eje

Para observar el análisis de resultados del parámetro con número de pilas por eje, se realizara una comparación de resultados con los modelos de estudio M134 y M137, que son estructuras similares pero con una diferencia en el número de pilas por eje. Los modelos analizados tienen sección transversal tipo oblonga, con alturas de pilas extremas de cinco metros y pila central de diez metros, buen refuerzo longitudinal y transversal, con la sección agrietada, sin tomar en cuenta ni los efectos $P-\Delta$ ni la interacción suelo estructura tal y como se observa en la tabla 3.3. El modelo de estudio M134 es representado por una pila única por eje, mientras que el modelo M137 es representado por múltiples pilas por eje. En la figura 6.10 se observa la comparación de las curvas de capacidad para los modelos de estudio en la dirección longitudinal de análisis.

Los desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso obtenidos mediante las rotaciones del FEMA 356, se observan en las curvas de capacidad de la figura 6.11. y 6.12, en la dirección longitudinal de análisis.

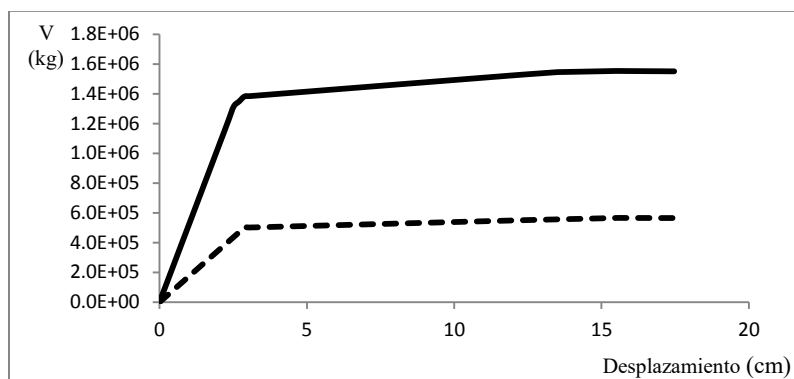


Figura 6.10. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea discontinua) y M137 (línea continua) en la dirección longitudinal.

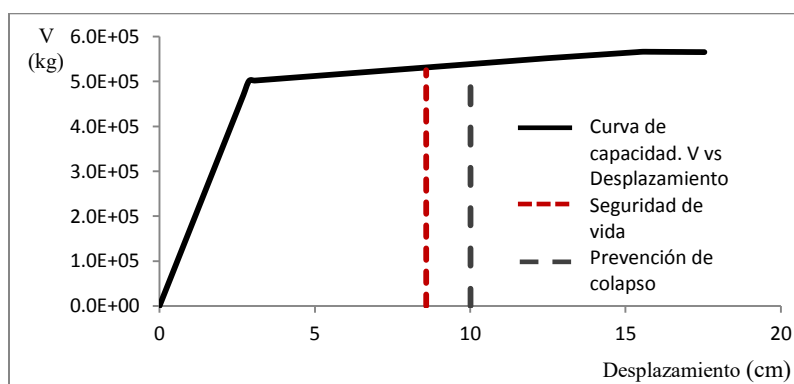


Figura 6.11. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (pila única) en la dirección longitudinal.

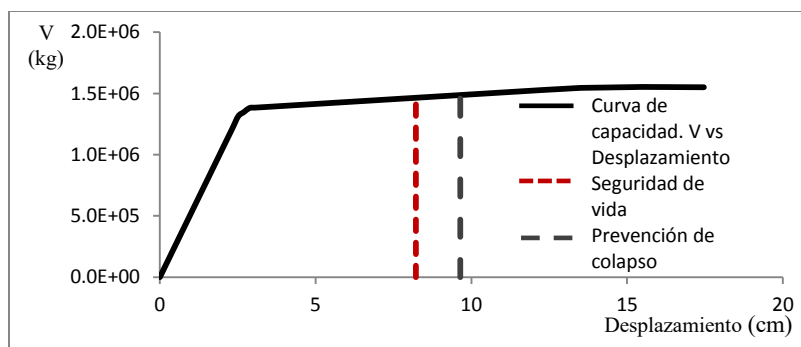


Figura 6.12. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M137 (múltiples pilas) en la dirección longitudinal.

Analizando la curva de capacidad de ambos modelos de estudio, se puede observar que para el modelo con pilas únicas por eje, como para el modelo con múltiples pilas por eje, la diferencia en la ductilidad que desarrollan es muy poca, esto quiere decir que el desplazamiento de fluencia y el desplazamiento último para los límites de desempeño de seguridad de vida y prevención de colapso son muy similares, la única diferencia radica en la rigidez y la resistencia de ambos modelos. Se observa que el modelo con múltiples pilas desarrolla una ligera mayor ductilidad que el modelo con una pila por eje, caso contrario para los modelos con pilas altas donde se nota una diferencia de ductilidades, entre pilas únicas y múltiples pilas, hasta de más del 25% en algunos casos, tal efecto de ductilidades se explica más detalladamente en la sección 6.9.1.2. de este trabajo de investigación. En la tabla 6.3 se muestran los desplazamientos de fluencia y los desplazamientos últimos para los límites de desempeño de análisis.

Tabla 6.3. Ductilidades obtenidas para los modelos con pilas únicas y múltiples pilas por eje, en la dirección longitudinal.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48
M137	2.70	8.22	3.04	9.64	3.57

Para la dirección transversal de análisis de los modelos de estudio, el comportamiento de la curva de capacidad es muy similar que en el caso longitudinal (la ductilidad es mayor para los modelos con múltiples pilas), pero con la diferencia que la ductilidad que se desarrolla en la dirección transversal es mucho mayor, esto debido a que aunque es desplazamiento último es menor al de la dirección longitudinal, también el desplazamiento a la primer fluencia es menor. En la figura 6.13 se comparan las curvas de capacidad y en las figuras 6.14 y 6.15 se muestran los desplazamientos de fluencia y últimos de cada curva. En la tabla 6.4 se comparan los valores de ductilidades de los modelos de estudio en la dirección transversal.

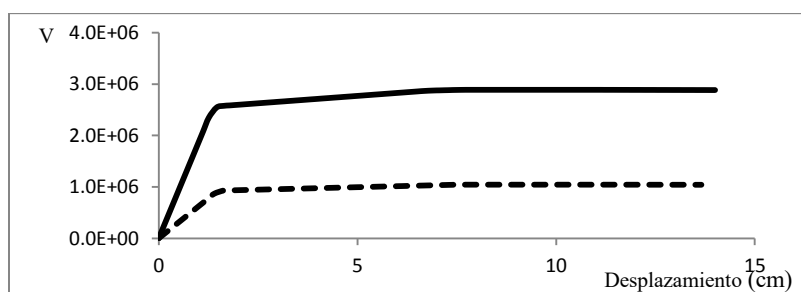


Figura 6.13. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea discontinua) y M137 (línea continua) en la dirección transversal.

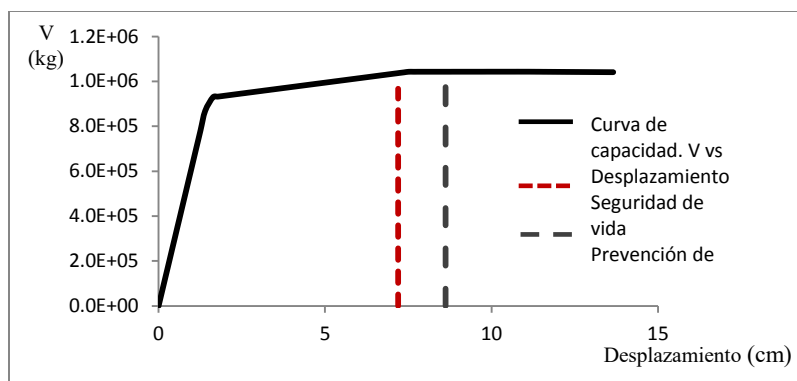


Figura 6.14. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (pila única) en la dirección transversal.

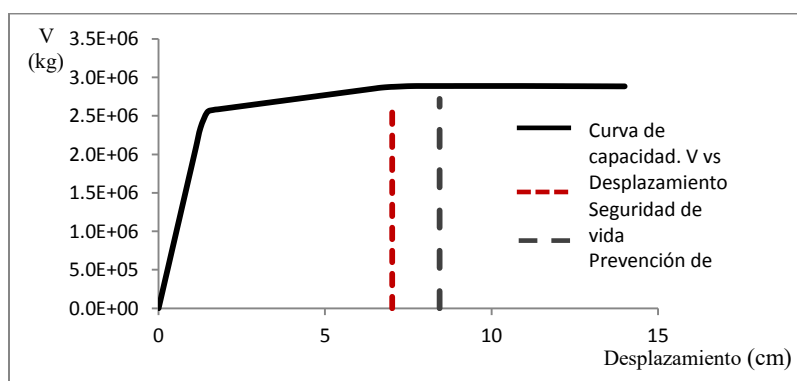


Figura 6.15. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M137 (múltiples pilas) en la dirección transversal.

Tabla 6.4. Ductilidades obtenidas para los modelos con pilas únicas y múltiples pilas por eje, en la dirección transversal.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M134	1.63	7.20	4.41	8.62	5.28
M137	1.46	7.02	4.82	8.44	5.79

6.3 Forma de la sección transversal

En la presente investigación se proponen tres diferentes tipos de forma de sección transversal para pilas de puentes carreteros comunes; sección tipo muro, sección oblonga maciza y sección circular hueca. Mediante la obtención de las curvas de capacidad, se registraron las ductilidades de los modelos de estudio para un posterior análisis de resultados de la influencia de la forma de la sección transversal en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes. En la figura 6.16 se presenta una comparación de curvas de capacidad de los tres modelos de estudio en condiciones similares de diseño y modelado, con la única diferencia de la forma de la sección transversal. Los tres modelos analizados a continuación solo son representativos, de los múltiples modelos considerados en este trabajo de investigación en su dirección longitudinal de análisis, donde el modelo M131 es representado por pilas tipo muro, el modelo M134 es representado por pilas de sección oblonga maciza y por último el modelo M139 es representado por pilas de sección circular hueca.

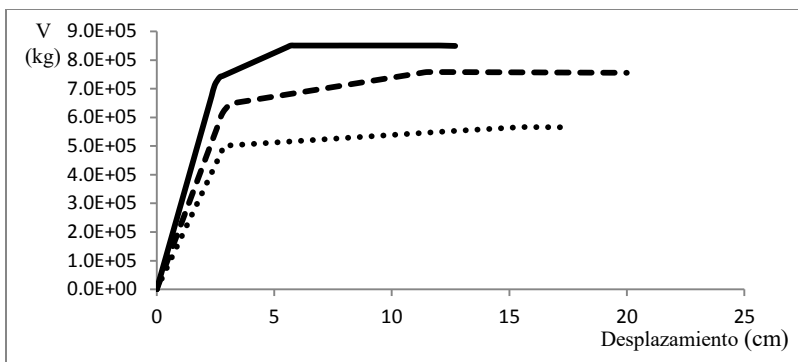


Figura 6.16. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M131 (línea discontinua), M134 (línea punteada) y M139 (línea continua), en la dirección longitudinal.

Para analizar las ductilidades de los modelos de estudio, en primer lugar se observaran los desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso por medio de las figuras 6.17 a 6.19, para puentes carreteros comunes con pilas de sección tipo muro, oblonga maciza y circular hueca, respectivamente, en su dirección longitudinal.

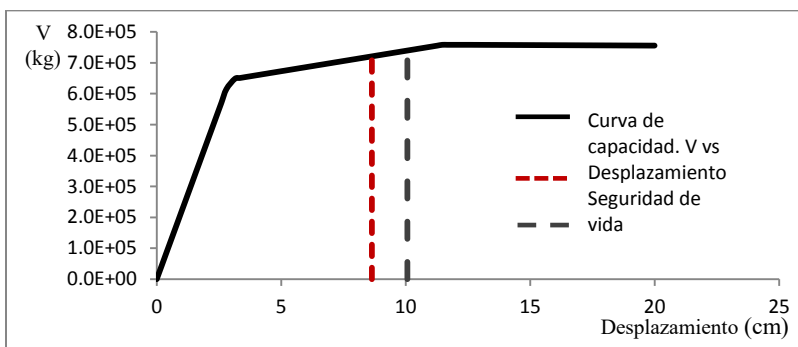


Figura 6.17. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 (sección tipo muro) en la dirección longitudinal.

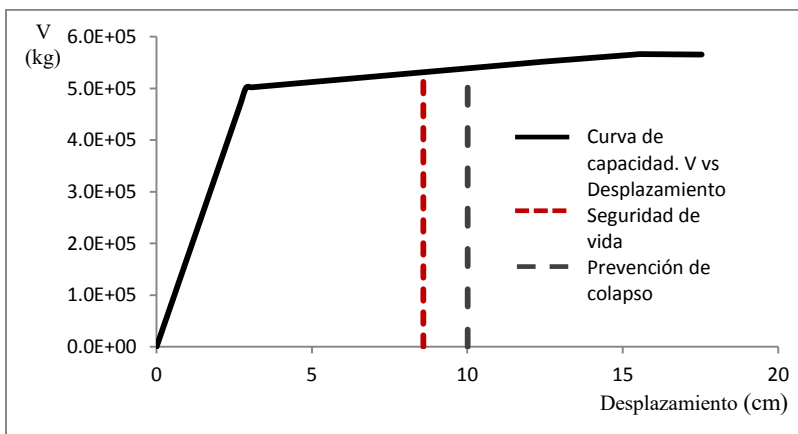


Figura 6.18. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (sección oblonga maciza) en la dirección longitudinal.

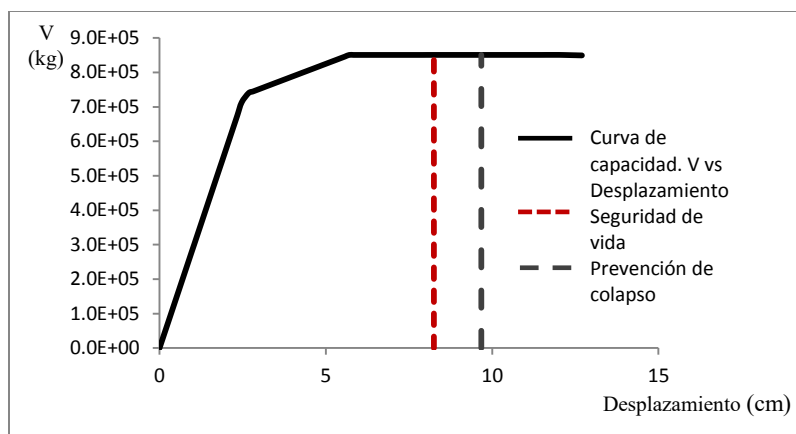


Figura 6.19. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M139 (sección circular hueca) en la dirección longitudinal.

Por medio de las curvas de capacidad de cada uno de los puentes de estudio con pilas de distinta forma de sección transversal, se puede observar que la sección circular hueca es la que alcanza mayor rigidez y resistencia, sin embargo el desplazamiento último y de fluencia es el menor de todos los casos, debido a que son los modelos que presentan una mayor rigidez, tal y como se puede observar en las curvas de capacidad. Para los modelos con sección tipo muro la resistencia y la rigidez es menor que el caso anterior, pero el desplazamiento último y de fluencia es más grande. Por último para los modelos con pilas de sección oblonga, la rigidez y la resistencia es la menor de todos los casos bajo este parámetro, por lo que al ser el modelo más flexible, el desplazamiento último y de fluencia son los mayores. Debido a estos factores, la ductilidad alcanzada por todos los modelos con distinta geometría de sección transversal, es muy similar, aunque se puede observar algunas variantes en la ductilidad que desarrollan, como que los modelos con pilas de sección circular hueca son los más dúctiles de todos los casos de estudio bajo este parámetro, seguida por los modelos con pilas de sección oblonga maciza y por lo tanto las pilas que mostraron un peor comportamiento dúctil, son las pilas de sección tipo muro en su dirección longitudinal. Si lo anteriormente explicado lo llevamos a números por medio de la tabla 6.5 se puede observar la influencia en la ductilidad de cada uno de los modelos de estudio con distinta forma de sección transversal para pilas de concreto de puentes carreteros comunes.

Tabla 6.5. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta forma de sección transversal en la dirección longitudinal.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M131	3.14	8.64	2.75	10.07	3.21
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48
M139	2.52	8.25	3.27	9.67	3.84

Para la dirección transversal de análisis, la ductilidad que desarrollan las pilas con diferente forma de sección transversal cambia. En la figura 6.20 se observa la comparación de las curvas de capacidad de los mismos modelos con forma de la sección transversal tipo muro, oblonga maciza y circular hueca. En las figuras 6.21 a 6.23 se indican los desplazamientos de fluencia y últimos, además de las ductilidades de los modelos con pilas de sección tipo muro, oblonga maciza y circular hueca, respectivamente, en la dirección transversal de análisis.

Para la dirección transversal de análisis se observa un cambio en las ductilidades según la forma de la sección transversal, donde la máxima rigidez y resistencia se da en los modelos con pilas de sección tipo muro por lo que, al ser pilas más rígidas el puente se desplazara menos en esta dirección; por lo que tanto el desplazamiento último como el desplazamiento de fluencia serán menores, aunque el desplazamiento de fluencia es mucho menor en proporción con respecto a los otros modelos bajo este parámetro, al ser un sistema muy rígido en la dirección transversal. Para la sección oblonga se observa una disminución significativa en la resistencia y rigidez de las pilas con respecto a las pilas tipo muro, por lo que dicho comportamiento se ve reflejado en la ductilidad que desarrollan las pilas con esta sección, con desplazamientos de fluencia y últimos mayores. La sección con el comportamiento menos dúctil de los modelos de estudio fue la sección circular hueca, con desplazamientos de fluencia y últimos mayores que los casos anteriores y con resistencia y rigidez, menores de los tres casos de estudio. Los desplazamientos de fluencia, desplazamientos últimos y ductilidades obtenidas para los casos con distinta forma de sección transversal de estudio en la dirección transversal de análisis se presentan en la tabla 6.6.

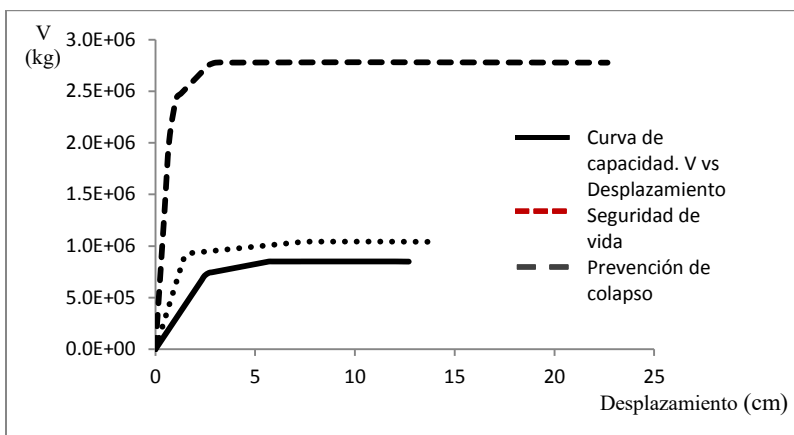


Figura 6.20. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M139 (línea continua), M131 (línea discontinua) y M134 (línea punteada) en la dirección transversal.

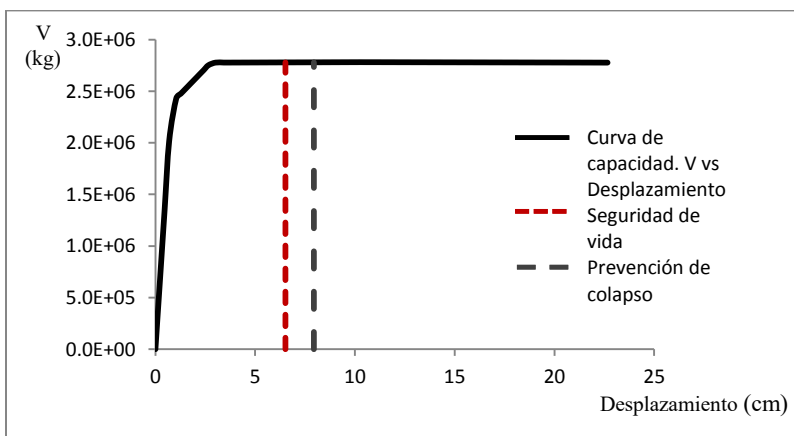


Figura 6.21. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131 (sección tipo muro) en la dirección transversal.

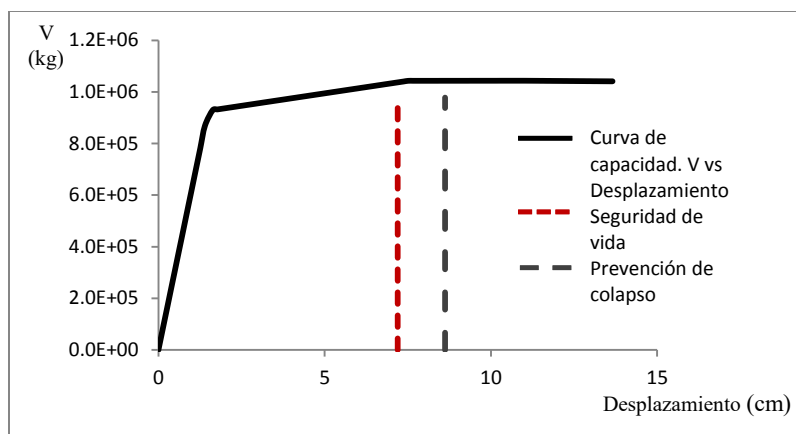


Figura 6.22. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (sección oblonga maciza) en la dirección transversal.

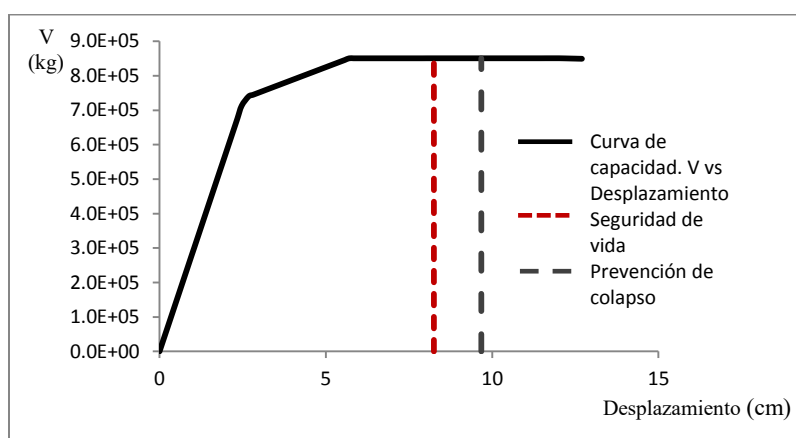


Figura 6.23. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M139 (sección circular hueca) en la dirección transversal.

Tabla 6.6. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta forma de sección transversal en la dirección transversal.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M131	1.05	6.52	6.23	7.94	7.6
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28
M139	2.52	8.25	3.27	9.67	3.84

6.4 Cuantía de acero longitudinal

Un parámetro relevante en esta investigación son las repercusiones en ductilidad dependiendo de la cuantía de acero longitudinal de las pilas de puentes carreteros comunes. Se propusieron tres alternativas de cuantía de acero longitudinal para las pilas de los modelos de análisis, representados por un grado de sobre refuerzo longitudinal para cuantías de acero mayores al 4%, un grado de buen refuerzo longitudinal para cuantías de acero del 1 al 4% y un grado de mal refuerzo longitudinal para representar las condiciones de un puente mal diseñado o viejo con un grado de refuerzo longitudinal menor al 1%.

Entonces, son modelos similares con la única diferencia en la cuantía de acero longitudinal. En la figura 6.24 se muestran las curvas de capacidad de los tres modelos de estudio para las distintas cuantías de acero longitudinal en la dirección longitudinal de análisis, donde el modelo M121 representa las pilas con un sobre refuerzo de acero longitudinal, el modelo M134 para pilas con un buen diseño de acero longitudinal y el modelo M147 con un diseño de escaso refuerzo de acero longitudinal. Los desplazamientos últimos de los modelos de estudio se muestran en las figuras 6.25 a 6.27 para los niveles de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso en la dirección longitudinal de análisis.

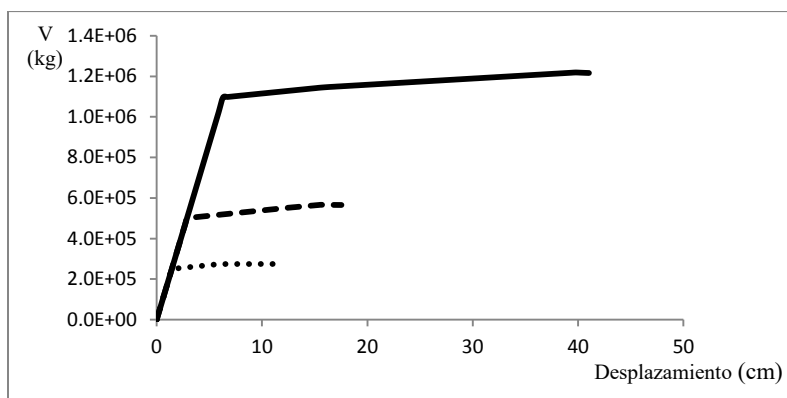


Figura 6.24. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M121 (línea continua), M134 (línea discontinua) y M147 (línea punteada) en la dirección longitudinal.

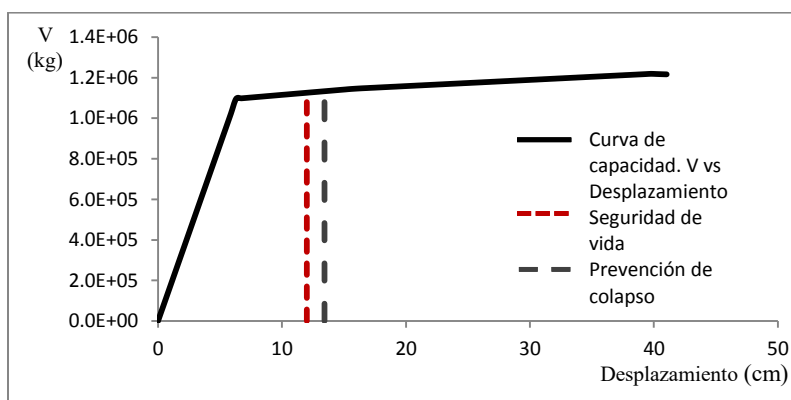


Figura 6.25. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M121 (sobre refuerzo) en la dirección longitudinal.

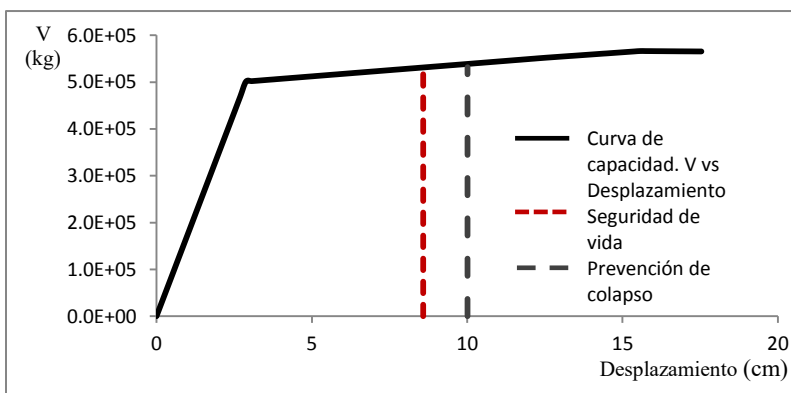


Figura 6.26. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (buen refuerzo) en la dirección longitudinal.

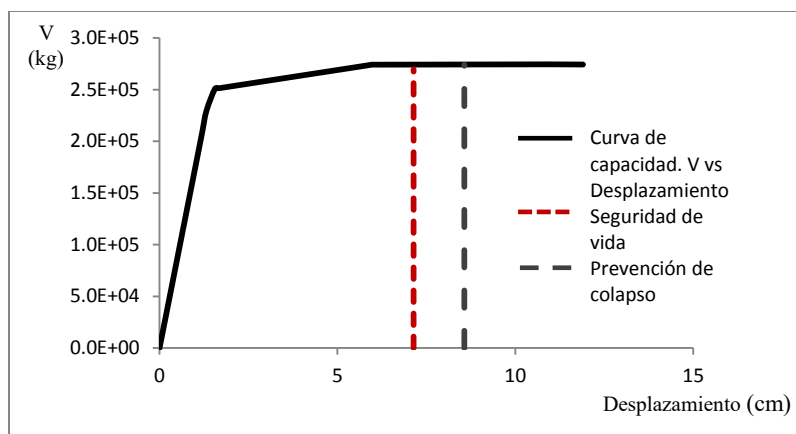


Figura 6.27. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M147 (escaso refuerzo) en la dirección longitudinal.

Para los modelos con igualdad de propiedades y parámetros, pero con diferentes cuantías de acero longitudinal, se observa, tal y como se esperaba, que la rigidez para todos los modelos es la misma, la única diferencia radica en su resistencia y en su capacidad de deformación. El modelo M121 con un grado de sobre resistencia de acero longitudinal es el que presenta una mayor resistencia, además de un desplazamiento último y de fluencia mayores. Por el contrario, la ductilidad que desarrollan las pilas de este modelo es la menor de los tres casos de estudio, porque a mayor grado de acero longitudinal efectivamente el puente se desplazara en mayor medida, aunque es posible que trabaje el concreto, pero que no fluya el acero y por lo tanto falle el elemento estructural rápidamente (menor capacidad de deformación). Para el modelo M134 con un buen grado de acero longitudinal, la resistencia, el desplazamiento de fluencia y el desplazamiento último, disminuyen con respecto al modelo con un grado de sobre resistencia, sin embargo la ductilidad aumenta porque a menor resistencia por una buena cuantía de acero longitudinal, el concreto va a trabajar de buena forma y además el acero va a fluir sin problemas; además, al tener un buen armado de acero longitudinal se evitan problemas por flexo-compresión, tal y como lo muestran los diseños de las pilas de estudio. Para el modelo M147 con un escaso porcentaje de acero longitudinal, tanto la resistencia como los desplazamientos de fluencia y últimos son los menores de los tres casos de estudio, aunque la ductilidad es la mayor debido al poco acero de refuerzo longitudinal, con lo cual se genera un elemento con mayor capacidad de deformación pero con posibles problemas por flexo-compresión. En la tabla 6.7 se observan las ductilidades obtenidas para los modelos con un grado de acero longitudinal de sobre refuerzo (M121), buen refuerzo longitudinal (M134) y escaso refuerzo longitudinal (M147).

Tabla 6.7. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta cuantía de acero longitudinal en la dirección longitudinal.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M121	6.30	12.00	1.91	13.43	2.13
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48
M147	1.56	7.14	4.59	8.57	5.50

Para la dirección transversal de análisis de los modelos en estudio, la tendencia es la misma, aunque las ductilidades en esta dirección son mayores. Dicha tendencia se ve reflejada en las ductilidades para los modelos con un grado de sobre refuerzo longitudinal donde las ductilidades obtenidas son menores y para los modelos con escaso refuerzo longitudinal donde las ductilidades obtenidas son las mayores de los tres casos de estudio. La comparación de las curvas de capacidad de los modelos de estudio bajo el parámetro

de distinta cuantía de acero longitudinal (sobre reforzado, buen refuerzo longitudinal, y escaso refuerzo longitudinal) se observa en la figura 6.28, respectivamente, mientras que en la tabla 6.8 se indican los desplazamientos, y las ductilidades obtenidas, para la dirección transversal de análisis.

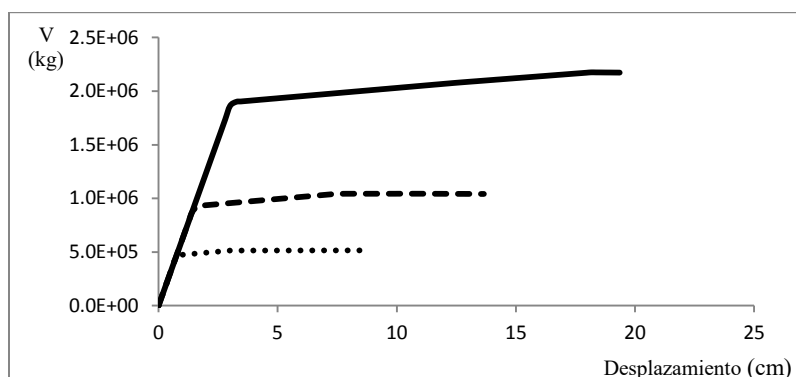


Figura 6.28. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M121 (línea continua), M134 (línea discontinua) M147 (línea punteada) en la dirección transversal.

Tabla 6.8. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta cuantía de acero longitudinal en la dirección transversal.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M121	3.26	8.35	2.56	9.57	2.94
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28
M147	0.85	6.46	7.63	7.89	9.32

6.5 Acero transversal

El grado de confinamiento de acero transversal, es otro parámetro propuesto en esta investigación, por lo que, así se para observar sus implicaciones en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes, para un grado de buen confinamiento transversal y un grado de nulo o escaso confinamiento transversal. Los modelos utilizados para ejemplificar el comportamiento obtenido, tienen similares condiciones de diseño, modelado, y propiedades, con la única diferencia del nivel de confinamiento de acero transversal, para un nivel de buen confinamiento transversal representado por el modelo M134, y para un escaso o nulo confinamiento transversal representado por el modelo M095. En la figura 6.29 se presentan las curvas de capacidad de los dos modelos de estudio para la dirección longitudinal de análisis. Como nota importante el grado de refuerzo transversal se le dio a los modelos de estudio, por medio de las rotaciones que propone el FEMA 356 para columnas de concreto reforzado. En las figuras 6.30 y 6.31 se observan los desplazamientos últimos de los modelos de análisis para un grado de buen y escaso confinamiento transversal respectivamente, para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso.

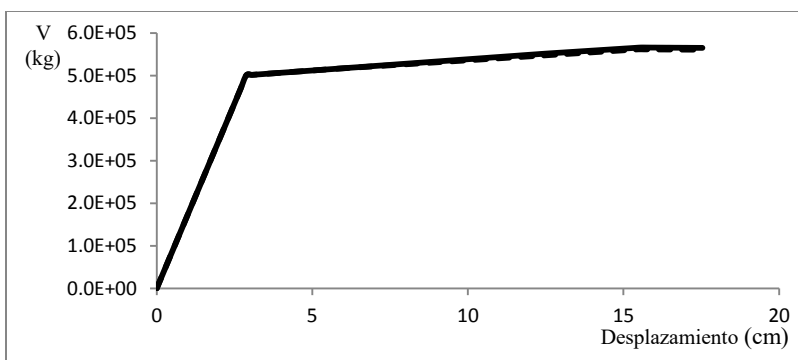


Figura 6.29. Curva de capacidad de los modelos de estudio en la dirección longitudinal M134 (Buen confinamiento transversal, y M095 (Escaso confinamiento transversal).

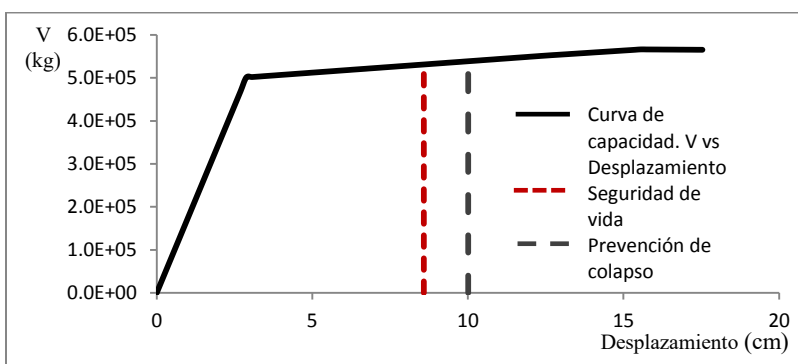


Figura 6.30. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (buen confinamiento transversal) en la dirección longitudinal.

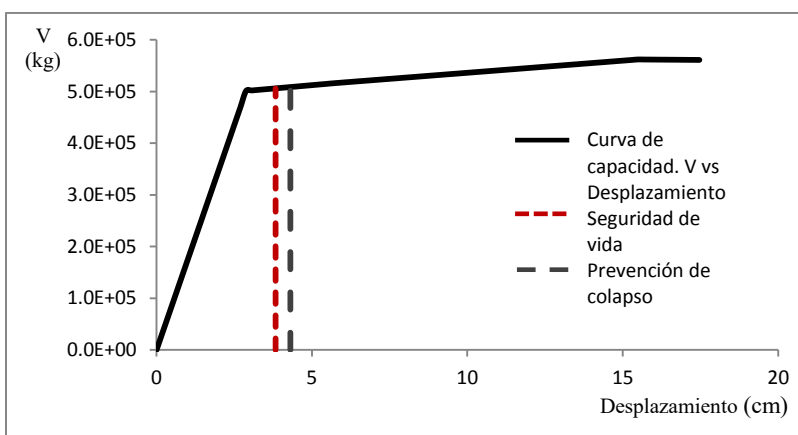


Figura 6.31. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M095 (escaso confinamiento transversal) en la dirección longitudinal.

Mediante la curva de capacidad y los desplazamientos últimos obtenidos, se puede observar que el modelo con buen confinamiento transversal (M134) desarrolla una mayor ductilidad, debido a que el desplazamiento último para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso es mayor (al ser obtenido directamente de la propuesta de FEMA 356) y el desplazamiento de fluencia es el mismo para ambos casos de estudio. Al tener desplazamientos últimos mayores también las ductilidades obtenidas son mayores. Mediante los desplazamientos últimos obtenidos bajo este parámetro se observa una total influencia del confinamiento de acero transversal en la ductilidad que desarrollan las pilas de

puentes carreteros comunes, ya que el modelo con buen confinamiento transversal (M134) supera en más del doble, la ductilidad DEL modelo con escaso confinamiento transversal (M095), tal y como se observa en la tabla 6.9, donde se presentan los desplazamientos último y de fluencia, además de las ductilidades de los modelos de análisis en la dirección longitudinal.

Tabla 6.9. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinto confinamiento de acero transversal en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48
M095	2.88	3.83	1.33	4.31	1.50

Para la dirección transversal de análisis, la tendencia es similar pero con los valores de desplazamiento y ductilidad propios de la dirección de análisis. Para esta dirección, la tendencia es la misma que en la dirección longitudinal, esto quiere decir que los desplazamientos últimos y de fluencia más grandes se dan en los modelos con un buen confinamiento transversal, por lo que desarrollan más ductilidad para los dos niveles de desempeño propuestos en esta investigación, con una diferencia de ductilidades muy marcada con respecto a los modelos con poco o nulo confinamiento transversal, tal y como se muestra en la tabla 6.10.

Tabla 6.10. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinto confinamiento de acero transversal en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28
M095	1.63	2.44	1.50	2.92	1.79

6.6 Rigidez efectiva

Un aspecto bastante interesante en la presente investigación es la evaluación de la influencia de la rigidez efectiva en la ductilidad de las pilas de los puentes de estudio. En este trabajo se propuso, para un caso de análisis, agrietar la sección gruesa (modelo M134) de pilas y vigas conforme al reglamento (FEMA 356), mientras que para el otro caso de estudio, se propuso no agrietar la sección gruesa (modelo M056), para así observar las implicaciones en ductilidad bajo este parámetro.

Los modelos que se utilizaron son similares en todas sus propiedades, excepto en la rigidez efectiva de las pilas y vigas de los puentes carreteros comunes analizados. Para entender la influencia de la rigidez efectiva en los puentes carreteros comunes de estudio, se realizó una comparación de curvas de capacidad para ambos modelos de análisis por medio de la figura 6.32.

En las figuras 6.33 y 6.34 se presentan las curvas de capacidad con los desplazamientos últimos para la sección no agrietada y para la sección agrietada respectivamente, para un nivel de desempeño de seguridad y de prevención de colapso en ambos casos de estudio.

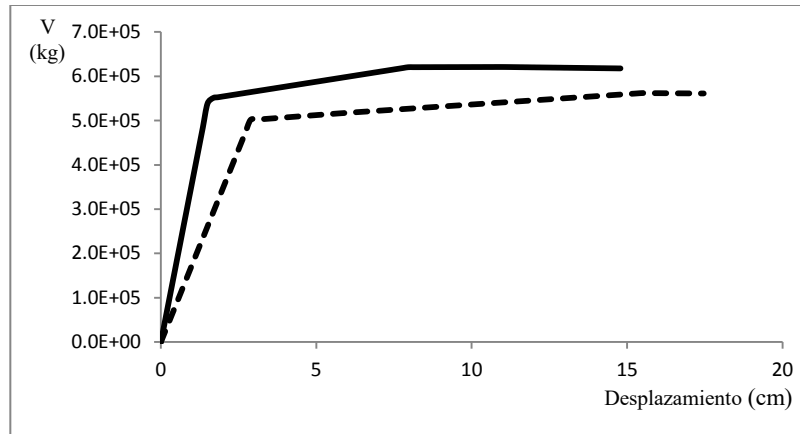


Figura 6.32. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M056 (línea continua), M134 (línea discontinua) en la dirección longitudinal.

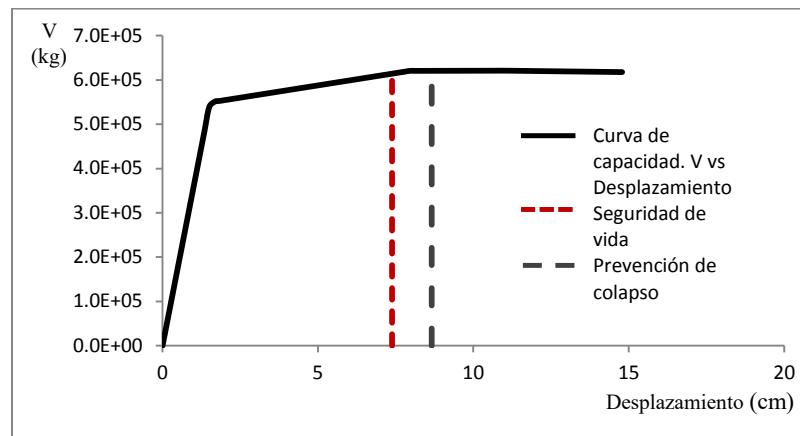


Figura 6.33. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056 (Sección no agrietada) en la dirección longitudinal.

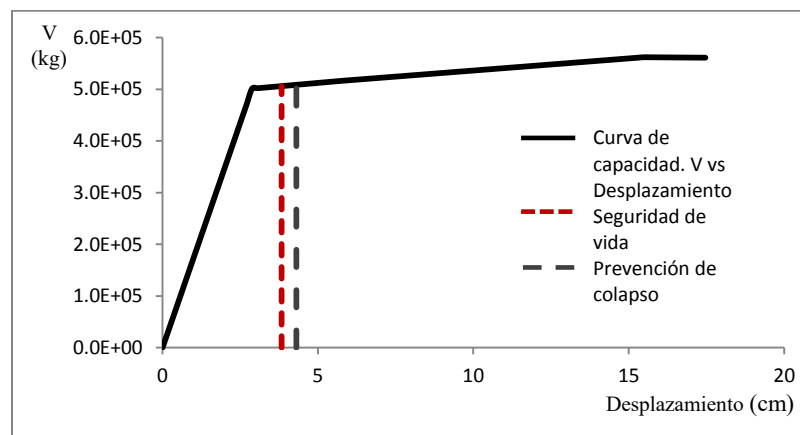


Figura 6.34. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (Sección agrietada) en la dirección longitudinal.

Por medio de las curvas de capacidad que se muestran en las figuras 6.32 a 6.34 se puede observar que el modelo con la sección no agrietada (M056) muestra una mayor rigidez y resistencia, sin embargo el desplazamiento último y de fluencia son menores con respecto al modelo con la sección agrietada (M134). Para las ductilidades obtenidas de ambos modelos de análisis, se observa que la mayor ductilidad se da en el modelo con la sección no agrietada, esto quiere decir que la mayor capacidad de deformación se da en el modelo con la sección no agrietada, debido a que, al considerar que no existe ningún tipo de agrietamiento desde su inicio, tiene una mayor capacidad de deformarse con respecto al modelo con sección agrietada, que desde un inicio se simula un agrietamiento del 50%. En la tabla 6.11 se presentan los desplazamientos y ductilidades obtenidas para los modelos de estudio, bajo el parámetro con diferente rigidez efectiva en sus elementos estructurales (vigas y pilas), en la dirección longitudinal de análisis, para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso.

Tabla 6.11. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta rigidez efectiva en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M056	1.68	7.38	4.40	8.66	5.15
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48

Para la dirección transversal de análisis bajo este parámetro, se tiene que las diferencias de rigidez, resistencia y capacidad de deformación se pueden observar por medio de la figura 6.35, la cual muestra las curvas de capacidad de los modelos de estudio con la sección no agrietada (M056) y con la sección agrietada (M134) respectivamente. En las figuras 6.36 y 6.37 se distinguen los desplazamientos últimos y de fluencia para los modelos de estudio con la sección no agrietada y con la sección agrietada para las columnas de concreto reforzado en la dirección transversal de análisis. Por medio de las curvas de capacidad se observa que la tendencia es similar que en la dirección longitudinal, esto es que el desplazamiento último y de fluencia son menores para el modelo con la sección no agrietada, sin embargo la ductilidad, la resistencia y la rigidez son mayores, al igual que en la dirección longitudinal de análisis, tal y como se muestra en la tabla 6.12, para la dirección transversal de análisis con sus respectivas ductilidades.

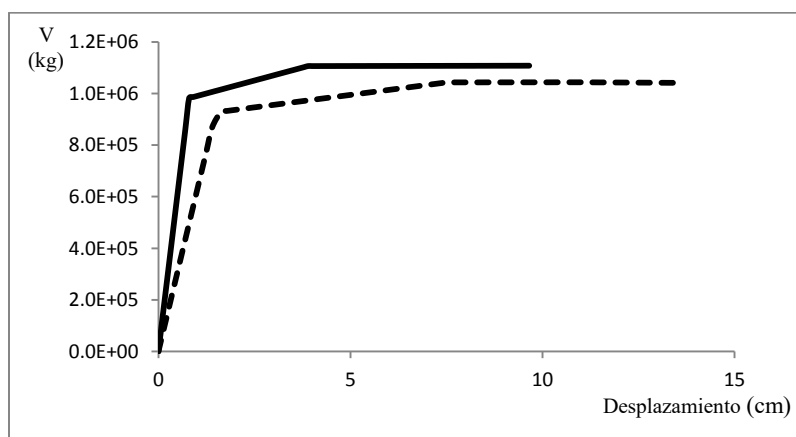


Figura 6.35. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M056 (línea continua), M134 (línea discontinua) en la dirección transversal.

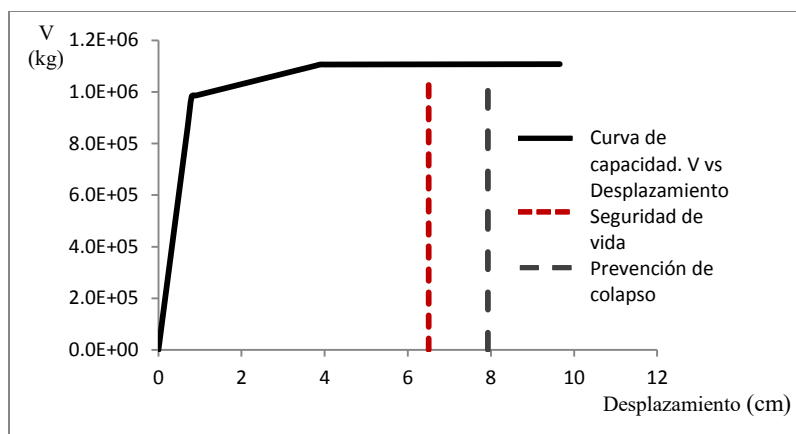


Figura 6.36. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056 (Sección no agrietada) en la dirección transversal.

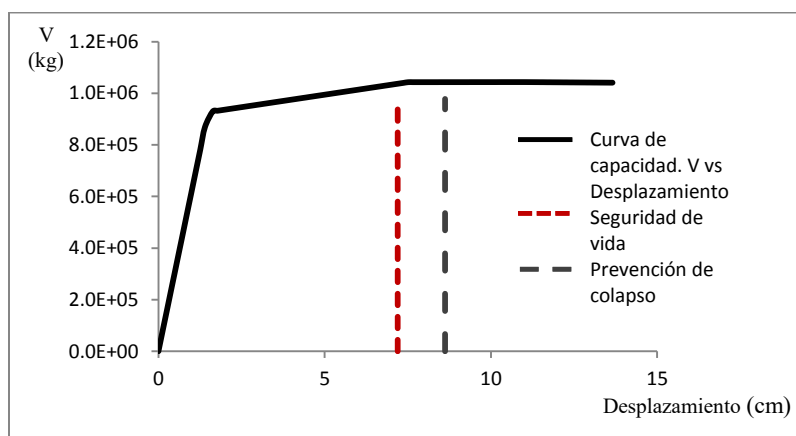


Figura 6.37. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M134 (Sección agrietada) en la dirección transversal.

Tabla 6.12. Ductilidades obtenidas para los modelos con distinta rigidez efectiva en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M056	0.80	6.50	8.13	7.93	9.91
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28

6.7 Efectos $P-\Delta$

Para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes, se tomaron dos modelos de análisis con idénticas propiedades, con la única diferencia de que para el primer modelo de estudio, no se tomaron en cuenta los efectos $P-\Delta$ (M134) y para el segundo (M160) sí se consideraron dichos efectos. Esto quiere decir que mediante las curvas de capacidad y las ductilidades obtenidas para cada modelo, se observara la influencia de tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$ en las pilas de los puentes de estudio. Una comparación de las curvas de capacidad de ambos modelos se presenta en la figura 6.38. Los desplazamientos últimos para los modelos de estudio sin tomar

en cuenta los efectos $P-\Delta$ y tomando en cuenta los efectos $P-\Delta$, respectivamente, se observan en las figuras 6.39 y 6.40, para los niveles de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso propuestos por el FEMA 356. Un resumen de los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 6.13.

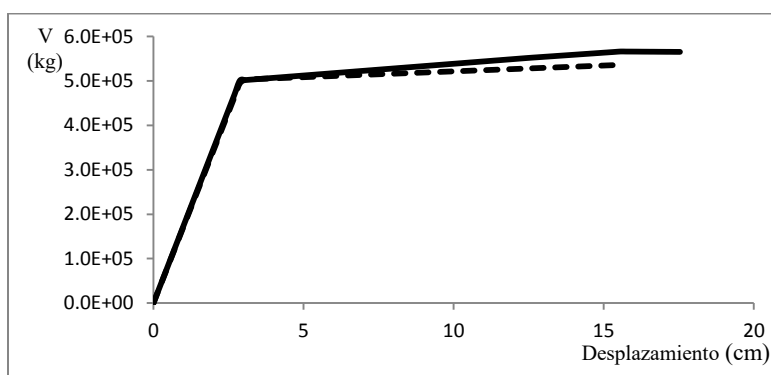


Figura 6.38. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea continua), M160 (línea discontinua) en la dirección longitudinal.

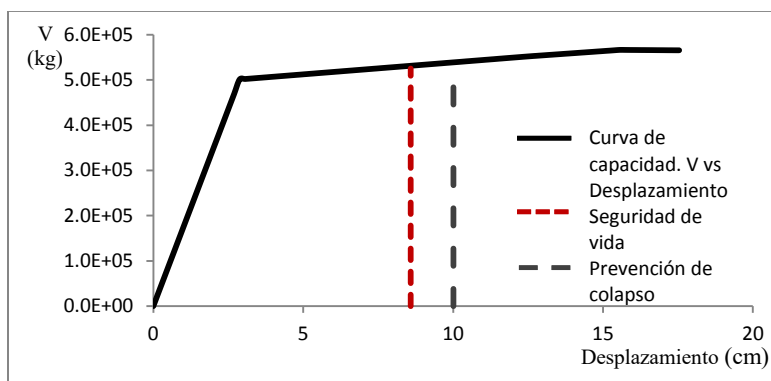


Figura 6.39. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (Sin efectos $P-\Delta$) en la dirección longitudinal.

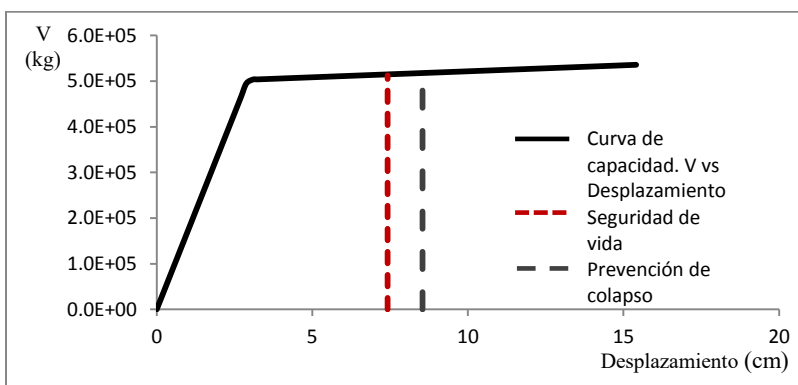


Figura 6.40. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M160 (Con efectos $P-\Delta$) en la dirección longitudinal.

Por medio de las curvas de capacidad se puede observar que para el modelo donde se toman en cuenta los efectos $P-\Delta$ (M160) la inclinación de la pendiente post-fluencia es menor, además de que los desplazamientos últimos y de fluencia son de igual manera menores, al tener una rigidez y resistencia similar que el otro caso de estudio, la ductilidad obtenida también es menor. Por el contrario, para el caso

de estudio sin tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$ (M134), la pendiente post-fluencia es mayor y por lo tanto también los desplazamientos últimos y de fluencia, además de la ductilidad, es mayor de igual forma. Entonces, esto quiere decir que la capacidad de deformación del modelo sin tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$ es mayor que para el modelo donde si se toman en cuenta los efectos $P-\Delta$.

Tabla 6.13. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Desplazamiento de fluencia (cm)	Seguridad de vida		Prevención de colapso	
		Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M160	2.88	7.42	2.58	8.54	2.97
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48

Para la dirección transversal de análisis el comportamiento es similar que en la dirección longitudinal de análisis, pero con la variante de las ductilidades y desplazamientos obtenidos para cada dirección de análisis. En la figura 6.41 se distingue la comparación de las curvas de capacidad de los modelos de estudio, en la dirección transversal, en tanto que en las figuras 6.42 y 6.43 y en la tabla 6.14 se presentan los valores de desplazamientos de fluencia, últimos y ductilidades obtenidos.

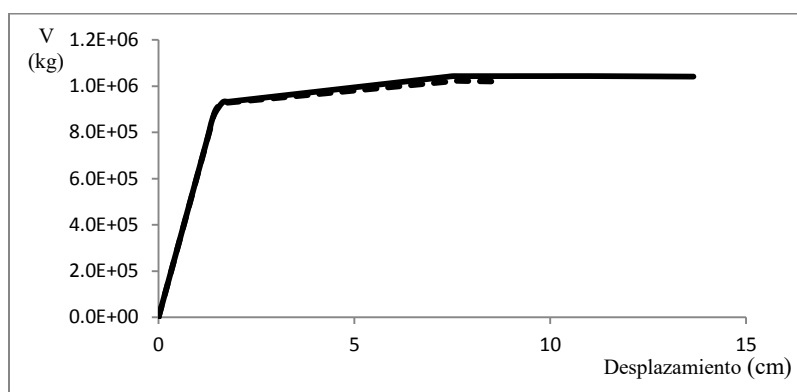


Figura 6.41. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M134 (línea continua), M160 (línea discontinua) en la dirección transversal.

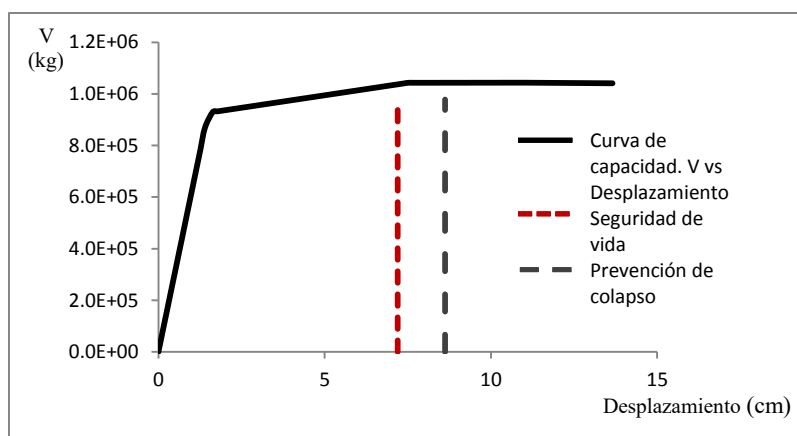


Figura 6.42. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (Sin efectos $P-\Delta$) en la dirección transversal.

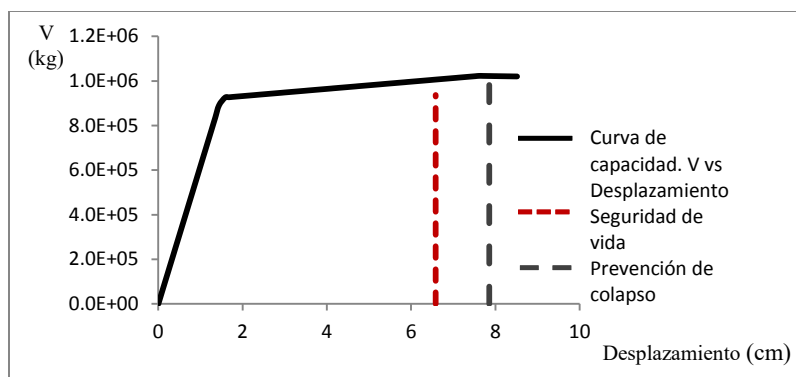


Figura 6.43. Desplazamientos últimos para los límites de seguridad de vida y prevención de colapso del modelo M160 (Con efectos $P-\Delta$) en la dirección transversal.

Tabla 6.14. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$ en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M160	1.58	6.58	4.16	7.85	4.96
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28

6.8 Interacción suelo estructura

Para observar los efectos de la interacción suelo estructura en las pilas de puentes carreteros comunes se propusieron tres modelos con similares propiedades y características, pero con distinto tipo de suelo de sustento (con variación en las propiedades del suelo y cimentación para cada modelo de estudio). Para el primer puente carretero, se propuso desplantar sobre suelo blando (M173), para el segundo modelo se propuso desplantar sobre suelo intermedio (M186) y para el último caso de estudio se propuso desplantar sobre suelo duro (M199). Además de los tres casos de estudio propuestos con interacción suelo estructura, para cada tipo de suelo se anexa un modelo contemplando el caso de apoyo empotrado (M134). La comparación de las curvas de capacidad de los modelos de estudio se presenta en la figura 6.44, en tanto que en las figuras 6.45 a 6.48 se muestran estas curvas de capacidad destacando los desplazamientos últimos obtenidos para cada modelo de análisis, para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso en la dirección longitudinal de análisis.

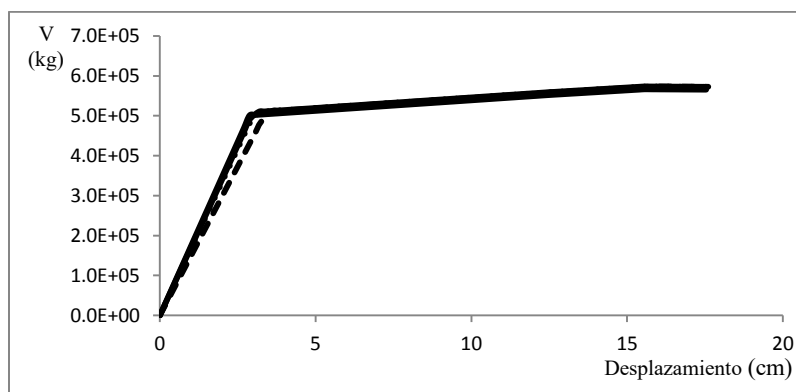


Figura 6.44. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M173 (línea discontinua), M186 (línea discontinua y puntos,) M199 (línea con puntos) y M134 (línea continua) en la dirección longitudinal.

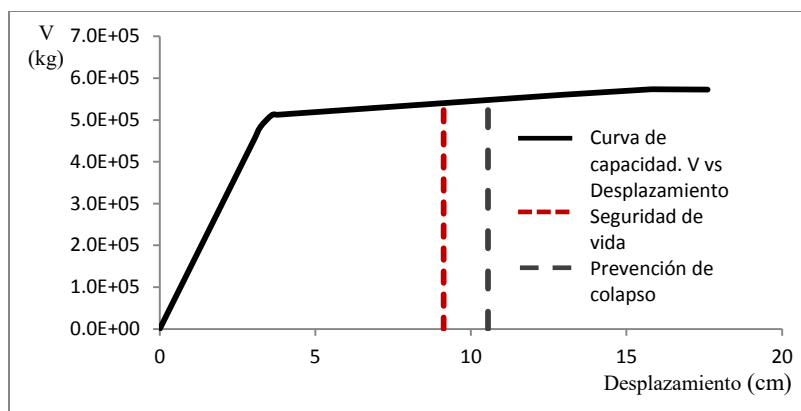


Figura 6.45. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173 (Suelo blando) en la dirección longitudinal.

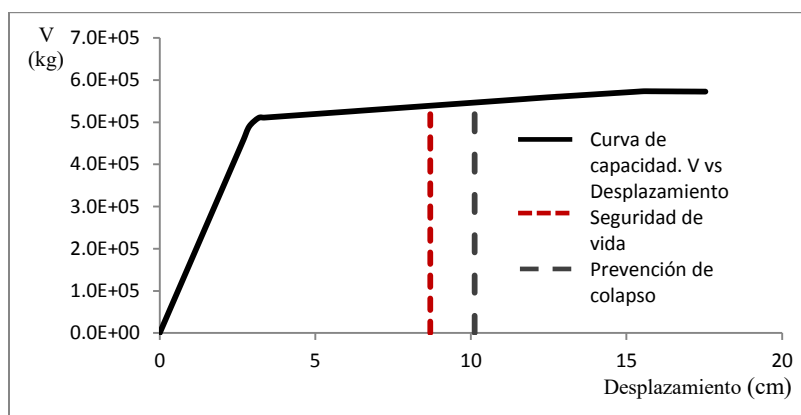


Figura 6.46. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186 (Suelo intermedio) en la dirección longitudinal.

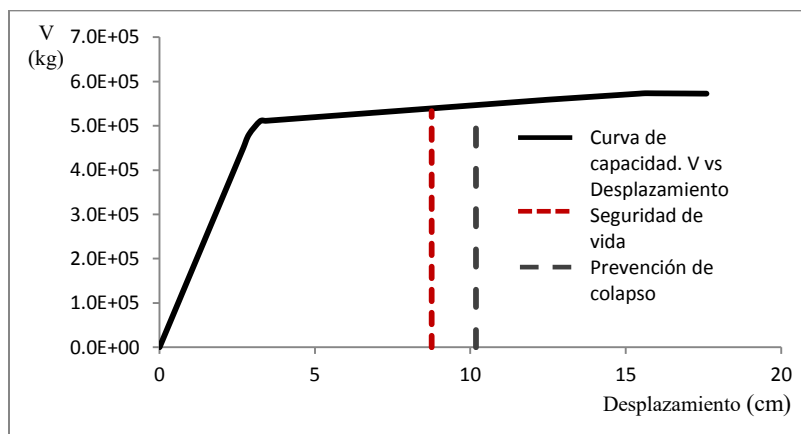


Figura 6.47. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199 (Suelo duro) en la dirección longitudinal.

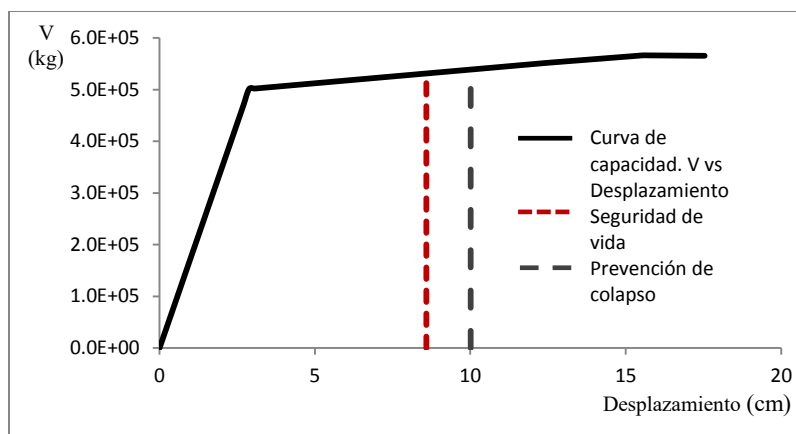


Figura 6.48. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (base empotrada) en la dirección longitudinal.

Por medio de las curvas de capacidad de los modelos de estudio se puede observar que la resistencia es prácticamente la misma para todos los casos, sin embargo la rigidez, los desplazamientos y las ductilidades cambian, entre más blando es el suelo, la estructura se comporta un poco más rígida. También se puede observar que los modelos con interacción suelo estructura modifican el desplazamiento último y el desplazamiento de fluencia; esto se puede observar en el modelo con suelo blando (M173), donde dichos desplazamientos son los más grandes de todos los casos de estudio. Así, entre más blando sea el suelo, los desplazamientos máximos van a ser mayores. La misma tendencia sigue el modelo con suelo intermedio (M186), donde los desplazamientos son mayores que en el caso de base empotrada, pero menores que el caso con suelo blando y suelo duro. De igual manera, los desplazamientos para suelo duro son mayores que los desplazamientos para base empotrada, pero menores que los desplazamientos para suelo blando (la interacción suelo estructura aumenta los desplazamientos de los modelos de estudio). Las ductilidades también se vieron afectadas, ya que en los modelos con interacción suelo estructura las ductilidades son menores que los modelos en base empotrada. Esto se puede observar en el modelo con suelo blando, donde la ductilidad es menor que para el caso con base empotrada y para los casos con suelo intermedio y suelo duro.

En la tabla 6.15 se observan los desplazamientos y ductilidades obtenidas de los modelos de análisis, donde se puede observar un caso interesante, en el que los desplazamientos son mayores para suelo duro que para suelo intermedio y las ductilidades son menores para suelo duro que para suelo intermedio. Esto es debido a que la cimentación diseñada para los modelos con suelo intermedio fue a base de zapatas y pilotes de cimentación, mientras que para los modelos con suelo duro todos cayeron en el diseño de cimentación a base de únicamente zapatas, sin pilotes de cimentación, lo cual quiere decir que para los casos de estudio influye más la cimentación mixta a base de zapatas y pilotes, que las propiedades del suelo impuestas para cada caso de estudio.

Tabla 6.15. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M173	3.60	9.12	2.54	10.55	2.93
M186	3.17	8.69	2.74	10.12	3.19
M199	3.23	8.76	2.71	10.18	3.15
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48

En la dirección transversal de análisis se nota una influencia más notoria de los desplazamientos y ductilidades obtenidas para los modelos con interacción suelo estructura, ya que para los modelos con interacción suelo estructura las ductilidades son más pequeñas con respecto a los modelos en base empotrada. Por consiguiente, los desplazamientos obtenidos con interacción suelo estructura, son mayores con respecto a los modelos en base empotrada. Las curvas de capacidad relacionadas se indican en la figuras 6.49 a 6.53 y mientras que un resumen de los resultados obtenidos se observa en la tabla 6.16.

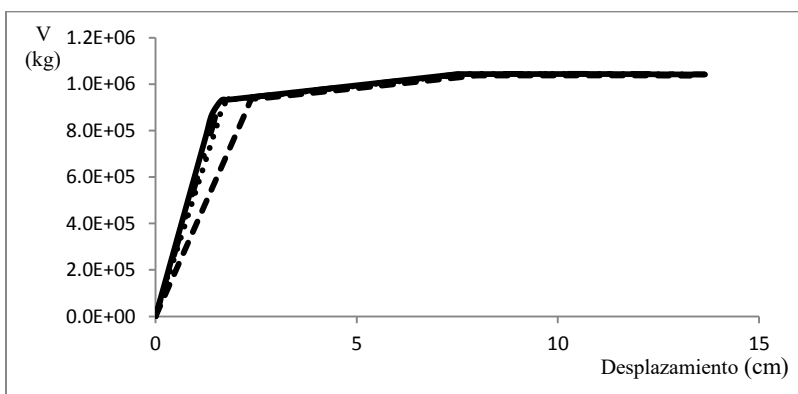


Figura 6.49. Comparación de curvas de capacidad de los modelos M173 (línea discontinua), M186 (línea discontinua y puntos,) M199 (línea con puntos) y M134 (línea continua) en la dirección transversal.

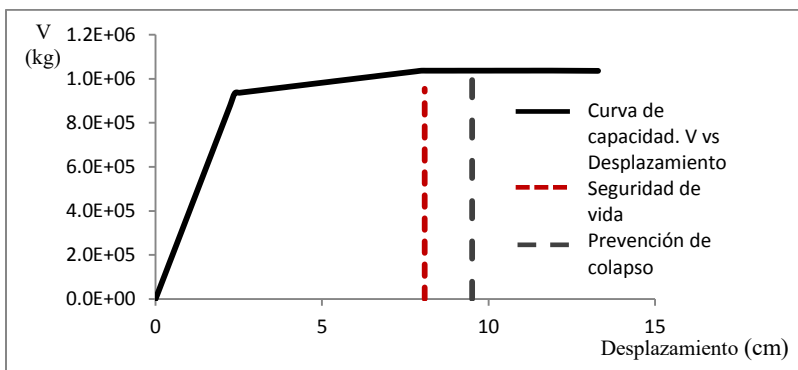


Figura 6.50. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173 (Suelo blando) en la dirección transversal.

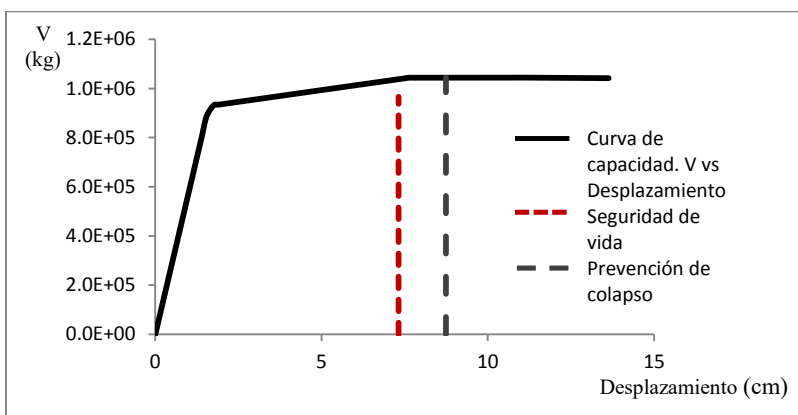


Figura 6.51. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186 (Suelo intermedio) en la dirección transversal.

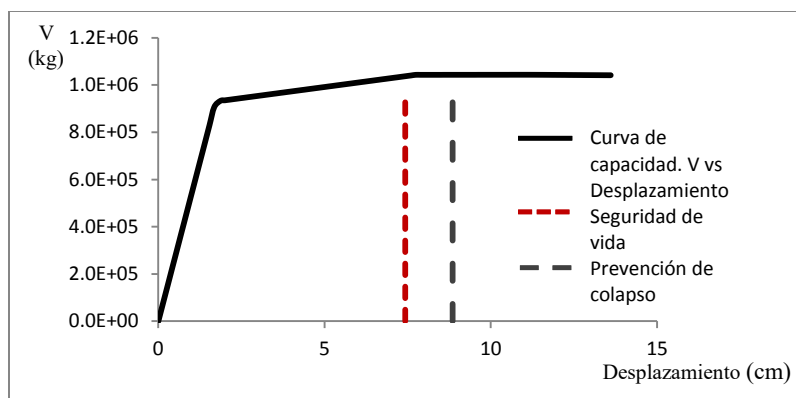


Figura 6.52. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199 (Suelo duro) en la dirección transversal.

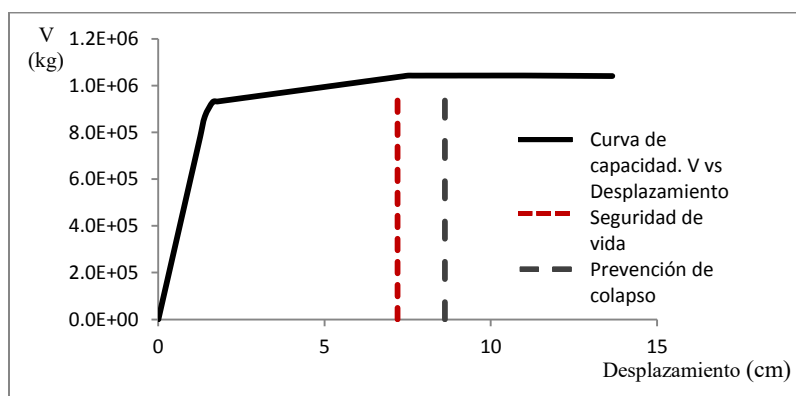


Figura 6.53. Desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134 (base empotrada) en la dirección transversal.

Tabla 6.16. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M173	2.38	8.08	3.40	9.51	4.00
M186	1.75	7.32	4.17	8.74	4.98
M199	1.86	7.43	3.98	8.85	4.75
M134	1.63	7.2	4.41	8.62	5.28

Para la dirección transversal de análisis, se observa que al igual que la dirección longitudinal, la resistencia es similar en los modelos en base empotrada que en los modelos con interacción suelo estructura, también se observa que entre más duro es el suelo, más grande será la rigidez de la estructura. Para los modelos con interacción suelo estructura el desplazamiento último y de fluencia son mayores que para los modelos en base empotrada, siendo el desplazamiento más grande el modelo en suelo blando. Los modelos con interacción suelo estructura presentan una ductilidad menor con respecto a los modelos en base empotrada, siendo el modelo con suelo blando el que desarrolla una menor ductilidad. Al igual que en la dirección longitudinal, los desplazamientos de los modelos con suelo duro son mayores que para los modelos con suelo intermedio y las ductilidades para los modelos con suelo duro son menores que para los modelos con suelo intermedio. Esto debido a que los modelos con suelo intermedio cayeron en el diseño de cimentación de zapatas con pilotes, mientras que para los modelos con suelo duro, únicamente se diseñó la cimentación con zapatas.

6.9 Resumen de resultados (Gráficas de las ductilidades obtenidas)

Para tener una mayor idea de la influencia de la variación de parámetros en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes comunes propuestos en esta investigación, se realizaron gráficas, para comparar las ductilidades obtenidas de modelos representativos a los que se les hizo un análisis estático no lineal (M001 a M208), en ambas direcciones de análisis, para un límite de desempeño de seguridad de vida.

6.9.1 Dirección longitudinal de análisis

6.9.1.1 Variación de altura de las pilas

Para entender la influencia de la variación de alturas en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente, se tiene que por medio de la tabla 6.17 y de la figura 6.54 se observan las ductilidades de algunos modelos representativos, de los múltiples modelos que se analizaron bajo este parámetro, donde las propiedades y las características de los modelos son similares, con la única diferencia en la altura de las pilas de puente, representado por pilas cortas para los modelos con altura de pilas de 5m para pilas extremas, y 10m para pila central (Modelos M134, M139 y M131), pilas intermedias para pilas extremas con 10m de altura y pila central de 20m (Modelos M135, M140 y M132), y pilas altas para pilas extremas de 20m de altura y pila central de 40m (Modelos M136, M141).

Tabla 6.17. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la altura de las pilas, en la dirección longitudinal de análisis.

Altura de pilas	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Pilas cortas	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27
	M131	Tipo muro	2.75
Pilas intermedias	M135	Oblonga	1.86
	M140	Circular hueca	2.10
	M132	Tipo muro	1.89
Pilas altas	M136	Oblonga	1.95
	M141	Circular hueca	2.12

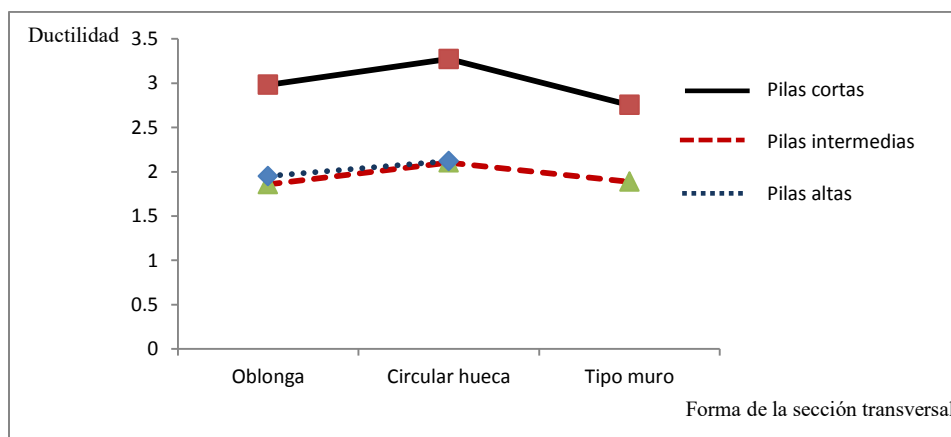


Figura 6.54. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de diferentes alturas de las pilas de puente, en la dirección longitudinal de análisis.

Por medio de la figura 6.54 se puede observar que las pilas que desarrollan una mayor ductilidad, son los modelos con pilas cortas, mientras que los modelos con pilas intermedias y pilas altas, son los modelos que muestran una menor ductilidad. La diferencia entre ductilidades para los modelos con pilas cortas, con respecto a los modelos con pilas intermedias y pilas altas, en muchos de los casos de estudio supera el 50%, con ductilidades muy similares para estos dos últimos casos de estudio, la misma tendencia se observa en los múltiples modelos de estudio, analizados bajo este parámetro en la dirección longitudinal de análisis.

6.9.1.2 Número de pilas por eje

Por medio de la tabla 6.18 y la figura 6.55, se indican las ductilidades obtenidas para el parámetro de estudio, relacionado con el número de pilas por eje, donde los modelos propuestos son similares en propiedades y características, con la única diferencia en el número de pilas por eje, representados por una pila única para los modelos M134 y M139, y múltiples pilas por eje, para los modelos M137 y M142, para pilas cortas, en la dirección longitudinal de análisis.

Tabla 6.18. Ductilidades obtenidas para observar la influencia del número de pilas por eje, para pilas cortas, en la dirección longitudinal de análisis.

Pilas cortas			
Número de pilas por eje	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
1 (Única)	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27
3 (Múltiples)	M137	Oblonga	3.04
	M142	Circular hueca	3.38

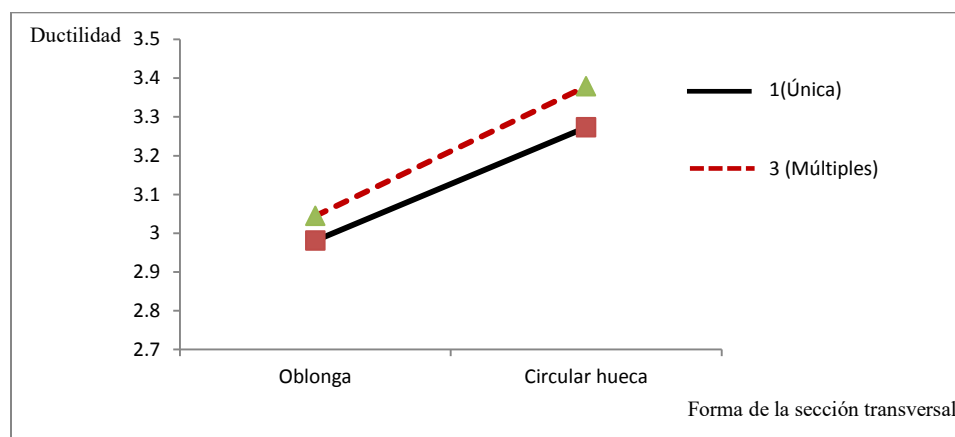


Figura 6.55. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de número de pilas por eje, para pilas cortas, en la dirección longitudinal de análisis.

Las ductilidades del parámetro representado por número de pilas por eje, para *pilas cortas*, tal y como se muestra en la figura 6.55, son muy similares, tanto para pilas únicas como para múltiples pilas por eje, esto quiere decir que para los modelos con pilas cortas, la influencia del número de pilas por eje es prácticamente nula, esto debido a que las ductilidades obtenidas tanto para pilas únicas por eje, como para múltiples pilas por eje son muy parecidas.

En la tabla 6.19 y en la figura 6.56 se observan las ductilidades obtenidas para el parámetro, referente al número de pilas por eje, para *pilas altas*, de modelos representativos, en la dirección longitudinal de análisis.

Tabla 6.19. Ductilidades obtenidas para observar la influencia del número de pilas por eje, para pilas altas, en la dirección longitudinal de análisis.

Pilas altas			
Número de pilas por eje	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
1 (Única)	M136	Oblonga	1.95
	M141	Circular hueca	2.12
3 (Múltiples)	M138	Oblonga	1.56
	M143	Circular hueca	1.59

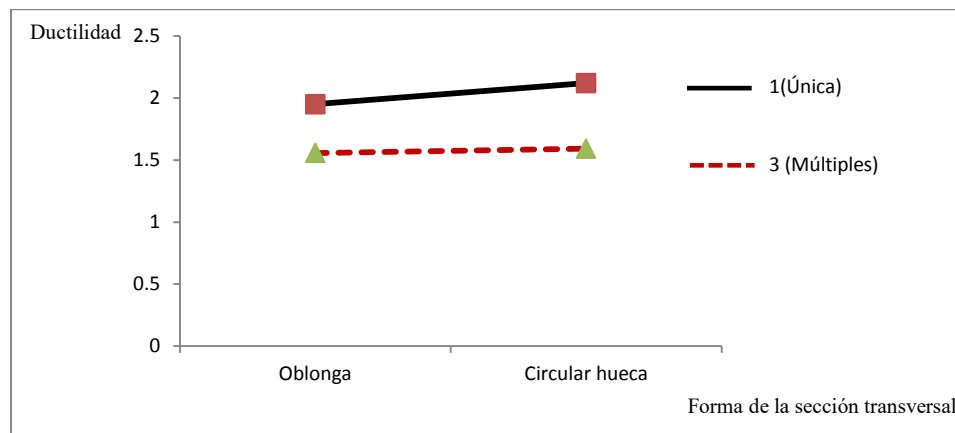


Figura 6.56. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de número de pilas por eje, para pilas altas, en la dirección longitudinal de análisis.

Para el parámetro referente al número de pilas por eje, en los modelos con *pilas altas*, a diferencia de los modelos con pilas cortas, se puede observar que existe una mayor diferencia entre ductilidades para pilas únicas y múltiples pilas, esto quiere decir que los modelos con múltiples pilas por eje, mostraron una menor ductilidad con respecto a los modelos con pila única por eje, en ocasiones hasta con más del 75% en la diferencia de ductilidades de ambos casos.

6.9.1.3 Forma de la sección transversal

Las ductilidades obtenidas para modelos representativos con similares propiedades y características, pero con la única diferencia en la forma de la sección transversal, se indican en la tabla 6.20 y la figura 6.57, donde el modelo M131 es representado con pilas de sección transversal en forma tipo muro, el modelo M134 en pilas con forma oblonga maciza y el modelo M139 es representado por pilas de forma circular hueca, en la dirección longitudinal de análisis.

Tabla 6.20. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la forma de la sección transversal, en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
M131	Tipo muro	2.75
M134	Oblonga	2.98
M139	Circular hueca	3.27

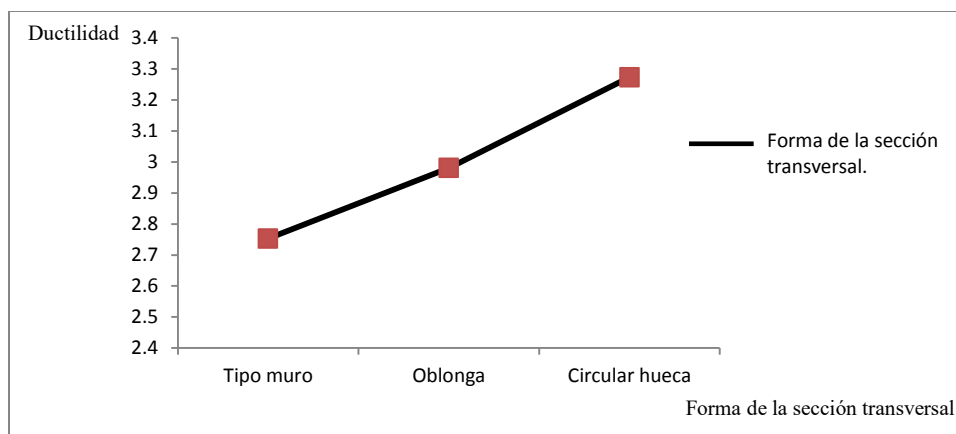


Figura 6.57. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la forma de la sección transversal, en la dirección longitudinal de análisis.

En la figura 6.57 se puede observar, que las pilas que desarrollaron una mayor ductilidad en la dirección longitudinal de análisis, son los modelos con pilas en forma circular hueca, mientras que las pilas que tuvieron un peor comportamiento dúctil, son las pilas con forma tipo muro seguido por las pilas con forma oblonga, esto quiere decir que las pilas que desarrollaron una mayor ductilidad ante condiciones similares en propiedades y características, son las pilas con forma de sección transversal, circular hueca, en la dirección de longitudinal análisis, y al ser modelos representativos, se pudo observar el mismo comportamiento para los múltiples modelos analizados bajo este parámetro.

6.9.1.4 Cuantía de acero longitudinal

Por medio de la tabla 6.21 y la figura 6.58, se muestra una comparación de ductilidades, para observar la influencia de la cuantía de acero longitudinal, en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes, donde los modelos, M118, M121 y M126 representan pilas con cuantía de acero longitudinal mayor al 4% para un grado de sobre refuerzo, los modelos M131, M134 y M139, con cuantía de acero longitudinal entre el 1% al 4% para un grado de buen refuerzo y por último los modelos M144, M147 y M152, con cuantías de acero longitudinal menores al 1%, para un grado de escaso refuerzo. Los modelos mostrados solo son representativos de los múltiples modelos que se analizaron bajo este parámetro, en la dirección longitudinal de análisis.

Tabla 6.21. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero longitudinal, en la dirección longitudinal de análisis.

Grado de acero longitudinal	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Sobre reforzado	M118	Tipo muro	1.63
	M121	Oblonga	1.91
	M126	Circular hueca	2.42
Buen refuerzo	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27
Escaso refuerzo	M144	Tipo muro	3.84
	M147	Oblonga	4.59
	M152	Circular hueca	6.15

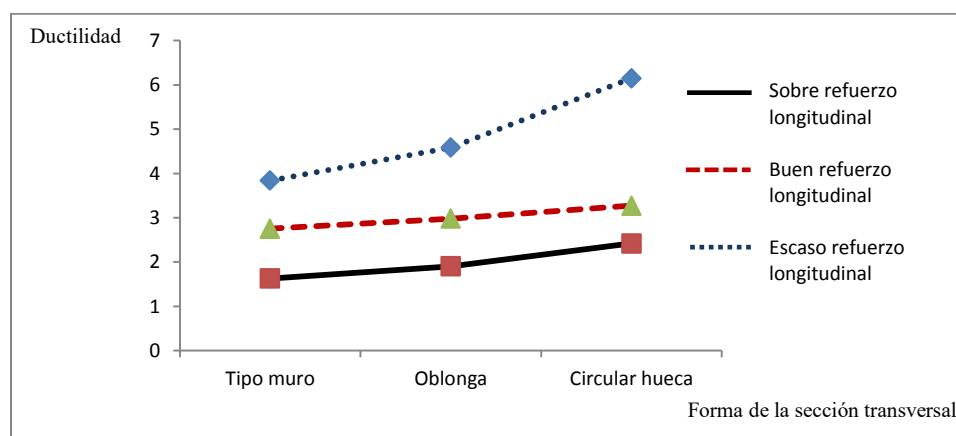


Figura 6.58. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero longitudinal, en la dirección longitudinal de análisis.

En lo que se refiere explícitamente a las ductilidades obtenidas, mediante la figura 6.58 se puede observar que los modelos que desarrollan una mayor ductilidad, son los modelos con un escaso refuerzo longitudinal, seguido por los modelos con un buen refuerzo longitudinal, mientras que los modelos que presentaron un peor comportamiento dúctil, son los modelos con un grado de sobre refuerzo longitudinal, esto quiere decir que la cuantía de acero longitudinal, realmente tiene repercusiones en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes, donde entre menor sea el grado de acero longitudinal de las pilas, más ductilidad van a presentar, pero posiblemente, debido a un mal diseño de acero longitudinal, se tengan otro tipo de problemas.

6.9.1.5 Acero transversal

En la tabla 6.22 y de la figura 6.59 se muestran las ductilidades obtenidas, para los modelos M092, M095 Y M100 que representan el grado de escaso refuerzo transversal, mientras que los modelos M131, M134 Y M139, representan un grado de buen refuerzo transversal, ambos grados con similares propiedades y características, excepto en la cuantía de acero transversal, por lo que se realizara una comparación de ductilidades para observar, la afectación en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente, conforme al grado de acero transversal.

Tabla 6.22. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero transversal, en la dirección longitudinal de análisis.

Grado de acero transversal	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Escaso	M092	Tipo muro	1.24
	M095	Oblonga	1.33
	M100	Circular hueca	1.38
Bueno	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27

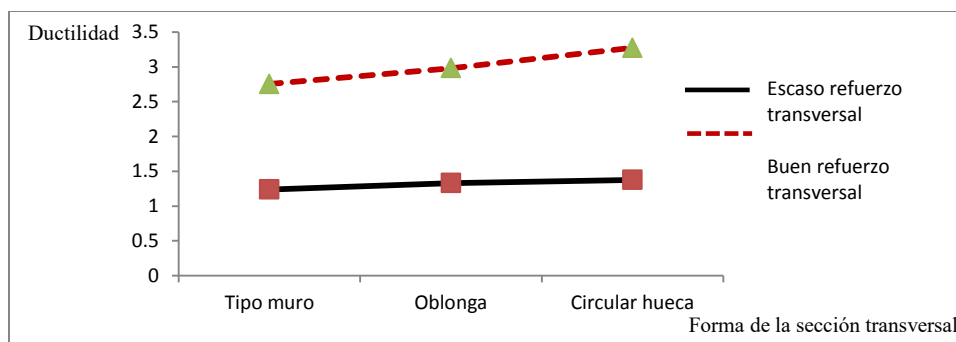


Figura 6.59. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero transversal, en la dirección longitudinal de análisis.

Se puede observar por medio de la figura 6.59, la alta influencia de la cuantía de acero transversal, en la ductilidad que desarrollan las pilas de puentes carreteros comunes, donde tal y como se esperaba, las pilas con un buen grado de acero longitudinal, presentan una mejor ductilidad hasta con una diferencia de más del 100% con respecto a los modelos con escaso refuerzo longitudinal, esto quiere decir que los modelos con una buena cuantía de acero longitudinal desarrollan mucho más ductilidad que los modelos con nula o escasa cuantía de acero transversal. La misma tendencia se observó, en los múltiples modelos de análisis, bajo este parámetro de estudio.

6.9.1.6 Rigidez efectiva

Mediante la tabla 6.23 y la figura 6.60, se observan las ductilidades obtenidas para el parámetro de la rigidez efectiva de los elementos estructurales, del puente común, donde los modelos M053, M056 y M061, representan modelos con la sección no agrietada para pilas y vigas ($E_c I_g$), mientras que los modelos M131, M134 Y M139 representan los modelos con la sección agrietada ($0.5E_c I_g$).

Tabla 6.23. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la rigidez efectiva de los elementos estructurales, en la dirección longitudinal de análisis.

Rigidez efectiva	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
No agrietado	M053	Tipo muro	4.46
	M056	Oblonga	4.40
	M061	Circular hueca	4.96
Agrietado	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27

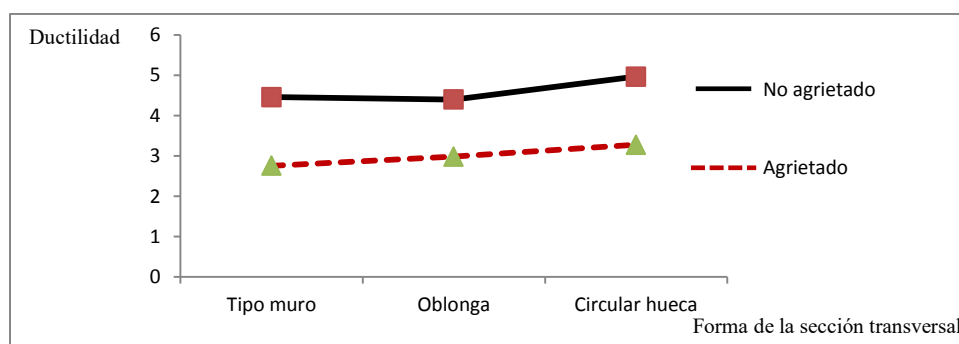


Figura 6.60. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la rigidez efectiva de los elementos estructurales, en la dirección longitudinal de análisis.

Por medio explícitamente de las ductilidades obtenidas, se observa que los modelos con la sección no agrietada presentan una mayor ductilidad, que los modelos con la sección agrietada, con diferencia de ductilidades en algunos casos, de más del 60%, por lo que la tendencia para los modelos analizados, bajo este parámetro de análisis, es que los modelos en que se agrieta la sección desarrollaran una menor ductilidad, que los modelos en los que no se agrieta la sección.

6.9.1.7 Efectos $P-\Delta$

En la tabla 6.24 y la figura 6.61 se presentan las ductilidades obtenidas para modelos representativos con propiedades y características similares, excepto en la influencia de considerar los efectos $P-\Delta$, donde se realiza una comparación de ductilidades para modelos sin considerar los efectos $P-\Delta$ (M131, M134 y M139) y considerando los efectos $P-\Delta$ (M157, M160, M165), para la dirección longitudinal de análisis de los modelos de estudio.

Tabla 6.24. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de los efectos $P-\Delta$, en la dirección longitudinal de análisis.

Efectos $P-\Delta$	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Sin considerar	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27
Considerando	M157	Tipo muro	2.32
	M160	Oblonga	2.58
	M165	Circular hueca	3.10

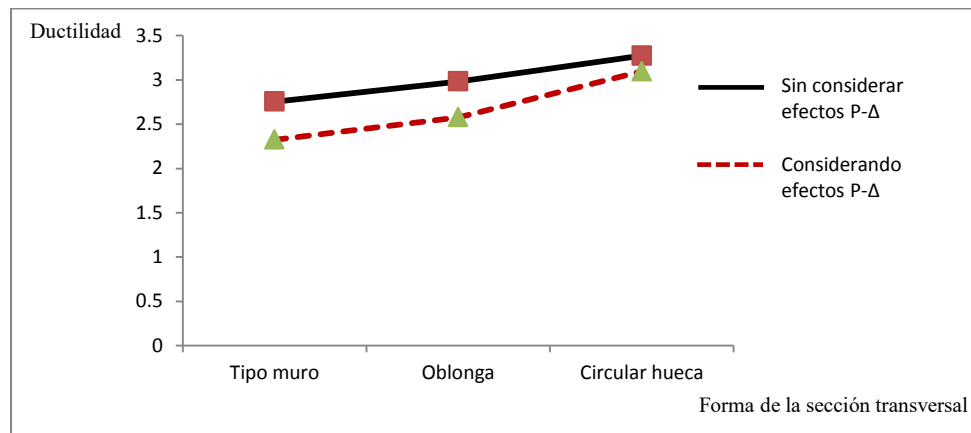


Figura 6.61. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro los efectos $P-\Delta$, en la dirección longitudinal de análisis.

Las ductilidades obtenidas, observadas en la figura 6.61, muestran que los modelos sin considerar los efectos $P-\Delta$, presentan una mayor ductilidad que los modelos en que si se tomó en cuenta dichos efectos, lo cual fue una constante para todos los modelos representativos, con propiedades y características similares pero con una única diferencia de tomar en cuenta los efectos $P-\Delta$.

Los modelos que presentaron una mayor diferencia entre ductilidades, fueron los modelos con pilas de sección transversal tipo muro, mientras que los modelos que tuvieron una menor diferencia de ductilidades fueron los modelos con pilas de sección circular hueca, para el parámetro de tomar la influencia de los efectos $P-\Delta$.

6.9.1.8 Interacción suelo estructura

En la tabla 6.25 y la figura 6.62 se indican las ductilidades obtenidas, bajo el parámetro de interacción suelo estructura, para modelos en suelo blando (M170, M173 y M178), suelo intermedio (M183, M186 y M191), suelo duro (M196, M199 y M204) y en base empotrada representado por los modelos (M131, M134 y M139), los cuales son modelos representativos, para la dirección longitudinal de análisis.

Tabla 6.25. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la interacción suelo estructura, en la dirección longitudinal de análisis.

Suelo	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Suelo blando	M170	Tipo muro	2.46
	M173	Oblonga	2.54
	M178	Circular hueca	2.75
Suelo intermedio	M183	Tipo muro	2.72
	M186	Oblonga	2.74
	M191	Circular hueca	3.02
Suelo duro	M196	Tipo muro	2.67
	M199	Oblonga	2.71
	M204	Circular hueca	2.96
Empotrado	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27

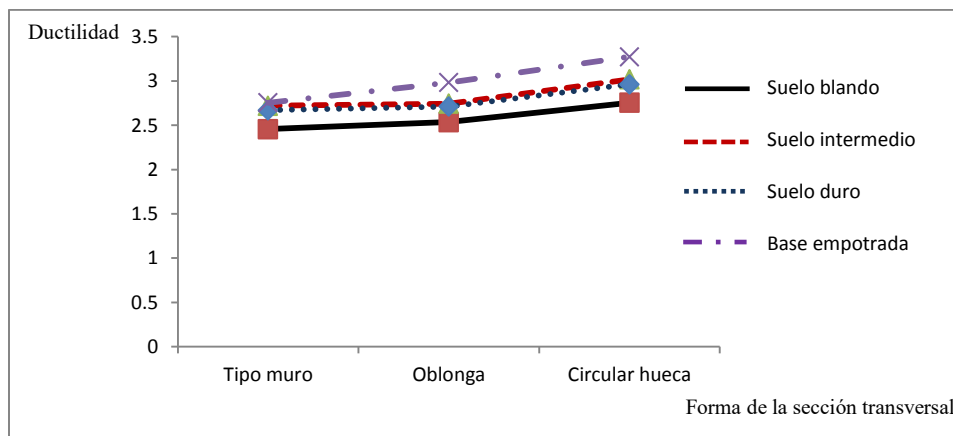


Figura 6.62. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro la interacción suelo estructura, en la dirección longitudinal de análisis.

En la figura 6.62 se puede observar que los modelos que desarrollaron una menor ductilidad son los modelos con pilas en suelo blando, seguidos por los modelos con suelo duro y suelo intermedio con ductilidades muy similares, mientras que los modelos en base empotrada, son los que desarrollaron una mayor ductilidad, esto quiere decir que la interacción suelo estructura, realmente afecta la ductilidad de los modelos de estudio, donde entre más blando sea el suelo, se presentara una menor ductilidad o visto de otra forma, entre más duro sea el suelo, mayor ductilidad obtendrán los modelos de estudio.

6.9.2 Dirección transversal de análisis

El *comportamiento de las ductilidades* obtenidas de los modelos de estudio en la dirección transversal, es básicamente el mismo que el ya descrito en la dirección longitudinal, esto quiere decir que el comportamiento que se refiere explícitamente a las ductilidades obtenidas en ambas direcciones de análisis es muy similar para la mayoría de los parámetros realizados en este trabajo de investigación, pero con la diferencia en los *valores de ductilidad obtenidos*, tal y como se puede observar en la tabla 6.26 y la figura 6.63.

Tabla 6.26. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal y transversal de análisis.

Dirección de análisis	Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
Longitudinal	M131	Tipo muro	2.75
	M134	Oblonga	2.98
	M139	Circular hueca	3.27
Transversal	M131	Tipo muro	6.23
	M134	Oblonga	4.41
	M139	Circular hueca	3.27

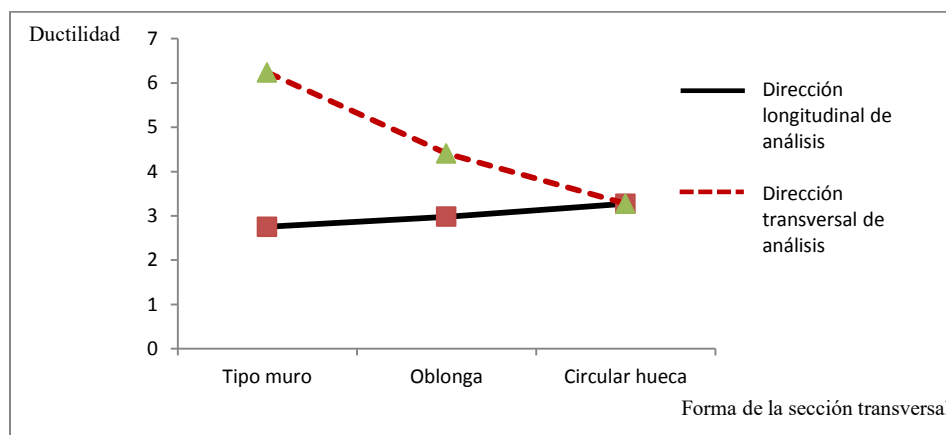


Figura 6.63. Ductilidades obtenidas, para representar las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal y transversal de análisis.

Mediante una comparación de ductilidades que se indica en la figura 6.63, de los mismos modelos en la dirección longitudinal y transversal de análisis (M131, M134 y M139) se puede observar que las ductilidades para la dirección transversal de los modelos con pilas tipo muro y oblonga maciza son mayores con respecto a los mismos modelos en la dirección longitudinal. Para los modelos con pilas con geometría de sección transversal, circular hueca, las ductilidades son las mismas, tanto para la dirección longitudinal, como para la dirección transversal de análisis, debido a la configuración estructural de los puentes de estudio. Este mismo comportamiento se pudo observar para los múltiples modelos realizados en este trabajo de investigación.

El único parámetro en la dirección transversal que mostro una real diferencia en las ductilidades obtenidas con respecto a la dirección longitudinal de análisis, es el parámetro para tomar en consideración la forma de la sección transversal de las pilas de puente, tal y como se indica en la tabla 6.27 y la figura 6.64, dicha comparación de resultados se realizó para los modelos, con pilas tipo muro (M131), oblonga maciza (M134), y circular hueca (m139).

Tabla 6.27. Ductilidades obtenidas para observar la influencia de la cuantía de acero transversal, en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Forma de la sección transversal de las pilas	Ductilidad
M131	Tipo muro	6.23
M134	Oblonga	4.41
M139	Circular hueca	3.27

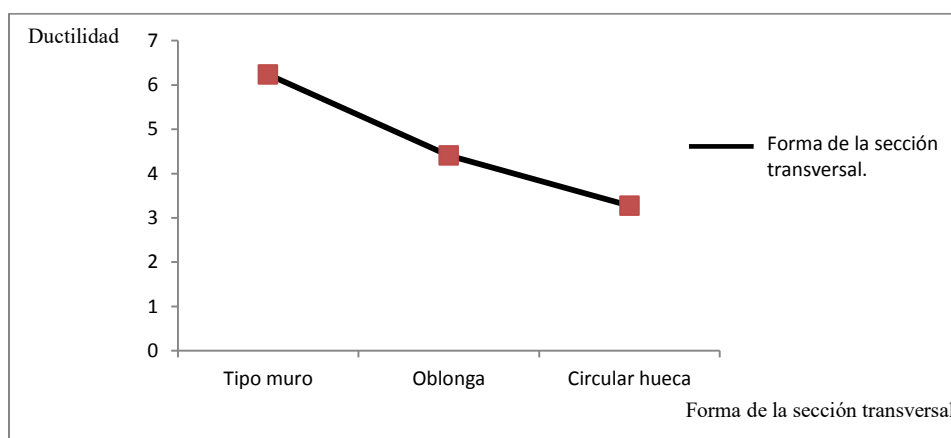


Figura 6.64. Ductilidades obtenidas, para representar el parámetro de la cuantía de acero transversal, en la dirección transversal de análisis.

Se puede observar por medio de la figura 6.64, en lo que se refiere explícitamente a las ductilidades obtenidas con este parámetro de estudio, en la dirección transversal de análisis, que los modelos que desarrollaron una mayor ductilidad son los modelos con pilas tipo muro, seguidos por los modelos con pilas de sección oblonga maciza, y los que presentaron una peor ductilidad son los modelos con sección circular hueca, caso contrario a las ductilidades descritas en la dirección transversal en la sección 6.9.1.5 de este trabajo de investigación.

Las gráficas con las ductilidades obtenidas, para los múltiples modelos de estudio, en ambas direcciones de análisis, se encuentran en el *Apéndice C* del presente trabajo de investigación.

6.10 Tablas con las ductilidades obtenidas

En las tablas 6.28 y 6.29, se muestra un resumen de resultados de los desplazamientos y ductilidades obtenidos, para los modelos, que se les realizó una análisis estático no lineal (M001 a M208), bajo los diferentes parámetros propuestos en este trabajo de investigación, en la dirección longitudinal y transversal de análisis respectivamente, para los límites de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso.

6.10.1 Dirección longitudinal de análisis

Tabla 6.28. Desplazamientos y ductilidades de los modelos de estudio, en la dirección longitudinal de análisis.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M001	4.47	5.17	1.16	5.65	1.26
M002	16.50	18.40	1.12	19.35	1.17
M003	8.61	9.16	1.06	9.63	1.12
M004	3.52	4.25	1.21	4.73	1.34
M005	12.90	14.80	1.15	15.75	1.22
M006	29.79	32.19	1.08	34.09	1.14
M007	3.33	4.14	1.25	4.62	1.39
M008	49.50	54.89	1.11	55.20	1.12
M009	2.13	3.03	1.42	3.55	1.67
M010	7.60	9.50	1.25	10.45	1.38
M011	14.51	17.86	1.23	19.76	1.36
M012	2.13	2.93	1.37	3.40	1.60
M013	30.94	33.44	1.08	34.56	1.12
M014	1.65	2.48	1.50	2.96	1.79
M015	6.00	7.90	1.32	8.85	1.48
M016	4.80	5.70	1.19	6.22	1.30
M017	1.68	2.48	1.48	2.96	1.76
M018	6.50	7.90	1.22	8.85	1.36
M019	13.39	17.19	1.28	18.19	1.36
M020	1.49	2.29	1.54	2.76	1.86
M021	22.14	25.24	1.14	27.14	1.23
M022	1.43	2.33	1.63	2.80	1.96
M023	5.10	7.00	1.37	7.95	1.56
M024	11.00	14.43	1.31	16.33	1.48
M025	1.29	2.19	1.70	2.67	2.06
M026	18.78	22.08	1.18	23.98	1.28
M027	1.02	1.85	1.81	2.33	2.28
M028	3.60	5.50	1.53	6.45	1.79
M029	1.46	2.26	1.55	2.73	1.88
M030	0.86	1.69	1.97	2.29	2.66
M031	3.29	4.85	1.47	5.80	1.76
M032	5.52	8.57	1.55	10.48	1.90
M033	0.68	1.48	2.18	1.95	2.88
M034	9.00	12.80	1.42	14.70	1.63
M035	0.60	1.51	2.51	1.98	3.30
M036	2.19	4.00	1.82	4.95	2.26
M037	3.20	7.01	2.19	8.91	2.78
M038	0.41	1.31	3.18	1.79	4.33
M039	5.96	9.45	1.59	11.36	1.91
M040	4.47	9.92	2.22	11.35	2.54
M041	16.50	27.91	1.69	30.76	1.86
M042	8.61	13.91	1.62	15.33	1.78
M043	3.52	9.00	2.56	10.43	2.96
M044	12.90	24.31	1.88	27.16	2.11
M045	29.79	51.20	1.72	56.90	1.91

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M046	3.33	8.89	2.67	10.32	3.10
M047	49.50	72.30	1.46	78.00	1.58
M048	2.13	7.78	3.65	9.20	4.32
M049	7.60	19.08	2.51	21.93	2.89
M050	14.51	36.87	2.54	42.58	2.93
M051	2.13	7.70	3.62	9.12	4.28
M052	30.94	51.94	1.68	57.64	1.86
M053	1.65	7.35	4.46	8.66	5.25
M054	6.00	17.41	2.90	20.26	3.38
M055	4.80	10.50	2.19	11.92	2.48
M056	1.68	7.38	4.40	8.66	5.15
M057	6.50	17.42	2.68	20.27	3.12
M058	13.39	35.31	2.64	41.02	3.06
M059	1.49	7.04	4.73	8.46	5.69
M060	22.14	44.24	2.00	50.64	2.29
M061	1.43	7.08	4.96	8.50	5.96
M062	5.10	16.51	3.24	19.37	3.80
M063	11.00	33.37	3.03	39.08	3.55
M064	1.29	6.94	5.36	8.37	6.46
M065	18.78	41.08	2.19	46.78	2.49
M066	1.02	6.60	6.46	8.03	7.86
M067	3.60	15.01	4.17	17.87	4.96
M068	1.46	7.01	4.81	8.43	5.79
M069	0.86	6.36	7.40	7.87	9.16
M070	3.29	14.36	4.36	17.21	5.23
M071	5.52	27.60	5.00	33.31	6.04
M072	0.68	6.23	9.17	7.65	11.26
M073	9.00	31.80	3.53	37.50	4.17
M074	0.60	6.25	10.40	7.68	12.78
M075	2.19	13.51	6.16	16.36	7.47
M076	3.20	26.08	8.15	31.79	9.93
M077	0.41	6.06	14.67	7.49	18.12
M078	5.96	28.30	4.75	34.00	5.71
M079	8.38	8.98	1.07	9.45	1.13
M080	33.33	33.81	1.01	34.76	1.04
M081	16.55	16.82	1.02	17.30	1.05
M082	6.30	7.25	1.15	7.73	1.23
M083	25.85	27.01	1.04	27.96	1.08
M084	56.34	58.64	1.04	60.54	1.07
M085	6.34	7.03	1.11	7.51	1.18
M086	98.40	100.50	1.02	102.40	1.04
M087	3.95	4.81	1.22	5.29	1.34
M088	14.43	16.70	1.16	17.65	1.22
M089	26.00	30.45	1.17	32.35	1.24
M090	3.75	4.61	1.23	5.09	1.36
M091	55.50	59.30	1.07	61.20	1.10
M092	3.14	3.89	1.24	4.37	1.39
M093	12.30	13.70	1.11	14.65	1.19
M094	9.78	10.28	1.05	10.75	1.10
M095	2.88	3.83	1.33	4.31	1.50
M096	12.42	13.57	1.09	14.52	1.17
M097	24.00	27.80	1.16	29.71	1.24
M098	2.70	3.47	1.29	3.94	1.46
M099	40.95	44.75	1.09	46.65	1.14
M100	2.52	3.47	1.38	3.95	1.57
M101	10.08	11.72	1.16	12.67	1.26
M102	20.40	24.20	1.19	26.10	1.28
M103	2.37	3.32	1.40	3.72	1.57

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M104	36.58	39.23	1.07	41.14	1.12
M105	1.94	2.69	1.39	3.16	1.63
M106	7.49	8.95	1.19	9.90	1.32
M107	2.80	3.45	1.23	3.93	1.40
M108	1.56	2.39	1.53	2.86	1.84
M109	6.20	7.70	1.24	8.66	1.40
M110	9.35	13.16	1.41	15.06	1.61
M111	1.64	1.95	1.19	2.43	1.48
M112	17.10	20.90	1.22	22.80	1.33
M113	1.10	2.00	1.82	2.47	2.25
M114	4.03	5.93	1.47	6.89	1.71
M115	6.30	10.11	1.60	12.01	1.91
M116	1.10	1.60	1.46	2.07	1.89
M117	11.73	14.78	1.26	17.74	1.51
M118	8.38	13.66	1.63	15.16	1.81
M119	33.33	43.32	1.30	46.17	1.39
M120	16.55	21.57	1.30	23.00	1.39
M121	6.30	12.00	1.91	13.43	2.13
M122	25.85	36.51	1.41	39.36	1.52
M123	56.34	77.65	1.38	83.35	1.48
M124	6.34	11.78	1.86	13.21	2.08
M125	98.40	119.50	1.21	125.20	1.27
M126	3.95	9.56	2.42	10.99	2.78
M127	14.43	26.22	1.82	29.07	2.01
M128	26.00	49.77	1.91	55.47	2.13
M129	3.75	9.34	2.49	10.77	2.87
M130	55.50	78.30	1.41	84.00	1.51
M131	3.14	8.64	2.75	10.07	3.21
M132	12.30	23.21	1.89	26.07	2.12
M133	9.78	15.03	1.54	16.45	1.68
M134	2.88	8.58	2.98	10.01	3.48
M135	12.42	23.09	1.86	25.94	2.09
M136	24.00	46.82	1.95	52.53	2.19
M137	2.70	8.22	3.04	9.64	3.57
M138	40.95	63.75	1.56	69.45	1.70
M139	2.52	8.25	3.27	9.67	3.84
M140	10.08	21.21	2.10	24.06	2.39
M141	20.40	43.26	2.12	48.97	2.40
M142	2.37	8.00	3.38	9.42	3.98
M143	36.58	58.23	1.59	63.93	1.75
M144	1.94	7.44	3.84	8.87	4.58
M145	7.49	18.46	2.46	21.31	2.84
M146	2.80	8.20	2.93	9.63	3.44
M147	1.56	7.14	4.59	8.57	5.50
M148	6.20	17.22	2.78	20.07	3.24
M149	9.35	32.19	3.44	37.90	4.05
M150	1.64	6.70	4.09	8.13	4.96
M151	17.10	39.90	2.33	45.60	2.67
M152	1.10	6.74	6.15	8.17	7.45
M153	4.03	15.50	3.85	18.36	4.56
M154	6.30	29.20	4.64	34.91	5.54
M155	1.10	6.36	5.80	7.78	7.10
M156	11.73	33.78	2.88	39.48	3.37

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M157	3.07	7.14	2.32	8.19	2.67
M158	12.25	16.94	1.38	18.24	1.49
M159	9.62	14.71	1.53	16.08	1.67
M160	2.88	7.42	2.58	8.54	2.97
M161	12.06	17.03	1.41	18.35	1.52
M162	25.33	36.45	1.44	39.49	1.56
M163	2.70	8.15	3.02	9.55	3.54
M164	41.58	53.33	1.28	56.43	1.36
M165	2.52	7.80	3.10	9.27	3.68
M166	10.08	19.11	1.90	21.44	2.13
M167	21.00	40.74	1.94	45.83	2.18
M168	2.41	7.94	3.30	9.35	3.89
M169	36.44	56.15	1.54	61.32	1.68
M170	3.78	9.29	2.46	10.71	2.83
M171	12.50	23.41	1.87	26.27	2.10
M172	10.06	15.33	1.52	16.76	1.67
M173	3.60	9.12	2.54	10.55	2.93
M174	12.75	23.41	1.84	26.27	2.06
M175	25.83	47.45	1.84	53.16	2.06
M176	3.93	9.52	2.42	10.94	2.78
M177	42.85	64.62	1.51	70.31	1.64
M178	3.25	8.95	2.75	10.38	3.19
M179	10.50	21.56	2.05	24.41	2.33
M180	21.75	43.91	2.02	49.61	2.28
M181	3.89	9.52	2.44	10.94	2.81
M182	40.91	58.47	1.43	64.17	1.57
M183	3.20	8.70	2.72	9.99	3.12
M184	12.35	23.27	1.88	26.12	2.11
M185	9.83	15.08	1.53	16.50	1.68
M186	3.17	8.69	2.74	10.12	3.19
M187	12.46	23.13	1.86	25.99	2.08
M188	24.00	46.82	1.95	52.53	2.19
M189	3.06	8.41	2.75	9.83	3.21
M190	40.95	63.76	1.56	69.46	1.70
M191	2.76	8.33	3.02	9.76	3.53
M192	10.15	21.21	2.09	24.06	2.37
M193	20.46	43.28	2.12	48.98	2.39
M194	2.66	8.23	3.10	9.66	3.64
M195	36.73	58.39	1.59	64.09	1.74
M196	3.30	8.80	2.67	10.23	3.10
M197	12.44	23.35	1.88	26.21	2.11
M198	9.88	15.14	1.53	16.56	1.68
M199	3.23	8.76	2.71	10.18	3.15
M200	12.53	23.20	1.85	26.06	2.08
M201	25.80	47.42	1.84	53.13	2.06
M202	3.24	8.60	2.65	10.02	3.09
M203	42.87	64.64	1.51	70.34	1.64
M204	2.84	8.41	2.96	9.84	3.46
M205	10.32	21.38	2.07	24.23	2.35
M206	21.69	43.84	2.02	49.55	2.28
M207	2.91	8.50	2.92	9.92	3.41
M208	37.95	58.47	1.54	64.17	1.69

6.10.2 Dirección transversal de análisis

Tabla 6.29. Desplazamientos y ductilidades de los modelos de estudio, en la dirección transversal de análisis.

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M001	1.38	3.00	2.18	3.00	2.18
M002	3.75	5.65	1.51	6.15	1.64
M003	2.29	2.95	1.29	3.26	1.43
M004	1.79	2.62	1.46	2.80	1.57
M005	6.50	8.00	1.23	8.95	1.38
M006	13.38	16.29	1.22	18.19	1.36
M007	1.80	2.56	1.42	2.74	1.53
M008	25.37	26.95	1.06	28.85	1.14
M009	2.13	3.03	1.42	3.55	1.67
M010	7.60	9.50	1.25	10.45	1.38
M011	14.51	17.86	1.23	19.76	1.36
M012	2.13	2.93	1.37	3.40	1.60
M013	30.94	33.44	1.08	34.56	1.12
M014	0.60	1.45	2.42	1.93	3.21
M015	1.79	3.44	1.92	4.39	2.45
M016	1.42	2.20	1.55	2.68	1.88
M017	0.80	1.75	2.19	2.23	2.78
M018	3.28	4.88	1.49	5.83	1.78
M019	6.00	9.80	1.63	11.70	1.95
M020	0.93	1.67	1.80	2.15	2.31
M021	11.33	14.53	1.28	16.43	1.45
M022	1.43	2.33	1.63	2.80	1.96
M023	5.10	7.00	1.37	7.95	1.56
M024	11.00	14.43	1.31	16.33	1.48
M025	1.29	2.19	1.70	2.67	2.06
M026	18.78	22.08	1.18	23.98	1.28
M027	0.41	1.26	3.08	1.74	4.24
M028	1.21	2.86	2.36	3.82	3.15
M029	0.52	1.32	2.54	1.79	3.46
M030	0.50	1.35	2.70	1.83	3.65
M031	1.72	3.42	1.99	4.38	2.54
M032	2.77	6.22	2.25	8.13	2.93
M033	0.41	1.25	3.06	1.72	4.23
M034	5.02	8.42	1.68	10.32	2.06
M035	0.60	1.51	2.51	1.98	3.30
M036	2.19	4.00	1.82	4.95	2.26
M037	3.20	7.01	2.19	8.91	2.78
M038	0.41	1.31	3.18	1.79	4.33
M039	5.96	9.45	1.59	11.36	1.91
M040	1.38	5.98	4.34	6.93	5.03
M041	3.75	14.24	3.80	16.64	4.44
M042	2.29	7.08	3.09	8.19	3.58
M043	1.79	6.79	3.80	7.92	4.43
M044	6.50	17.50	2.69	20.35	3.13
M045	13.38	35.29	2.64	41.00	3.06

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M046	1.80	6.73	3.74	7.86	4.37
M047	25.37	45.95	1.81	51.65	2.04
M048	2.13	7.78	3.65	9.20	4.32
M049	7.60	19.08	2.51	21.93	2.89
M050	14.51	36.87	2.54	42.58	2.93
M051	2.13	7.70	3.62	9.12	4.28
M052	30.94	51.94	1.68	57.64	1.86
M053	0.60	6.20	10.34	7.63	12.72
M054	1.79	12.95	7.23	15.80	8.82
M055	1.42	6.95	4.88	8.38	5.88
M056	0.80	6.50	8.13	7.93	9.91
M057	3.28	14.39	4.39	17.24	5.26
M058	6.00	28.81	4.80	34.51	5.75
M059	0.93	6.42	6.90	7.85	8.44
M060	11.33	34.64	3.06	40.35	3.56
M061	1.43	7.08	4.96	8.50	5.96
M062	5.10	16.51	3.24	19.37	3.80
M063	11.00	33.37	3.03	39.08	3.55
M064	1.29	6.94	5.36	8.37	6.46
M065	18.78	41.08	2.19	46.78	2.49
M066	0.41	6.01	14.68	7.44	18.16
M067	1.21	12.37	10.20	15.22	12.55
M068	0.52	6.07	11.69	7.49	14.43
M069	0.50	6.10	12.21	7.53	15.06
M070	1.72	12.14	7.05	15.79	9.18
M071	2.77	25.24	9.11	30.94	11.17
M072	0.41	6.00	14.71	7.42	18.21
M073	5.02	27.42	5.46	33.12	6.59
M074	0.60	6.25	10.40	7.68	12.78
M075	2.19	13.51	6.16	16.36	7.47
M076	3.20	26.08	8.15	31.79	9.93
M077	0.41	6.06	14.67	7.49	18.12
M078	5.96	28.30	4.75	34.00	5.71
M079	2.19	2.95	1.35	2.95	1.35
M080	7.51	8.81	1.17	9.46	1.26
M081	3.86	4.62	1.20	4.87	1.26
M082	3.26	4.01	1.23	4.28	1.31
M083	11.60	13.50	1.16	14.45	1.25
M084	24.92	27.70	1.11	29.60	1.19
M085	3.28	3.88	1.18	4.15	1.27
M086	45.90	47.66	1.04	49.80	1.08
M087	3.95	4.81	1.22	5.29	1.34
M088	14.43	16.70	1.16	17.65	1.22
M089	26.00	30.45	1.17	32.35	1.24
M090	3.75	4.61	1.23	5.09	1.36
M091	55.50	59.30	1.07	61.20	1.10
M092	1.05	1.77	1.69	2.24	2.14
M093	2.80	4.70	1.68	5.65	2.02
M094	2.60	3.25	1.25	3.73	1.43
M095	1.63	2.44	1.50	2.92	1.79
M096	6.13	7.64	1.25	8.59	1.40
M097	12.85	15.45	1.20	17.36	1.35
M098	1.46	2.27	1.56	2.74	1.88
M099	21.51	24.41	1.13	26.31	1.22
M100	2.52	3.47	1.38	3.95	1.57
M101	10.08	11.72	1.16	12.67	1.26
M102	20.40	24.20	1.19	26.10	1.28
M103	2.37	3.32	1.40	3.72	1.57

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M104	36.58	39.23	1.07	41.14	1.12
M105	0.63	1.44	2.28	1.93	3.06
M106	1.99	3.69	1.86	4.64	2.33
M107	0.87	1.62	1.86	2.10	2.40
M108	0.85	1.71	2.02	2.18	2.58
M109	3.25	4.85	1.49	5.81	1.79
M110	5.13	8.53	1.66	10.43	2.03
M111	0.94	1.49	1.59	1.96	2.10
M112	9.73	12.78	1.31	14.68	1.51
M113	1.10	2.00	1.82	2.47	2.25
M114	4.03	5.93	1.47	6.89	1.71
M115	6.30	10.11	1.60	12.01	1.91
M116	1.10	1.60	1.46	2.07	1.89
M117	11.73	14.78	1.26	17.74	1.51
M118	2.19	6.75	3.08	7.70	3.51
M119	7.51	17.71	2.36	20.26	2.70
M120	3.86	8.57	2.22	9.77	2.53
M121	3.26	8.35	2.56	9.57	2.94
M122	11.60	23.01	1.98	25.86	2.23
M123	24.92	46.71	1.87	52.41	2.10
M124	3.28	8.63	2.63	10.05	3.07
M125	45.90	66.90	1.46	72.60	1.58
M126	3.95	9.56	2.42	10.99	2.78
M127	14.43	26.22	1.82	29.07	2.01
M128	26.00	49.77	1.91	55.47	2.13
M129	3.75	9.34	2.49	10.77	2.87
M130	55.50	78.30	1.41	84.00	1.51
M131	1.05	6.52	6.23	7.94	7.60
M132	2.80	14.21	5.07	17.06	6.09
M133	2.60	8.00	3.08	9.43	3.62
M134	1.63	7.20	4.41	8.62	5.28
M135	6.13	17.15	2.80	20.00	3.26
M136	12.85	34.48	2.68	40.18	3.13
M137	1.46	7.02	4.82	8.44	5.79
M138	21.51	43.41	2.02	49.11	2.28
M139	2.52	8.25	3.27	9.67	3.84
M140	10.08	21.21	2.10	24.06	2.39
M141	20.40	43.26	2.12	48.97	2.40
M142	2.37	8.00	3.38	9.42	3.98
M143	36.58	58.23	1.59	63.93	1.75
M144	0.63	6.21	9.85	7.64	12.11
M145	1.99	13.20	6.63	16.05	8.07
M146	0.87	6.37	7.31	7.80	8.94
M147	0.85	6.46	7.63	7.89	9.32
M148	3.25	14.37	4.42	17.22	5.30
M149	5.13	27.55	5.37	33.25	6.49
M150	0.94	6.24	6.66	7.67	8.19
M151	9.73	31.78	3.27	37.48	3.85
M152	1.10	6.74	6.15	8.17	7.45
M153	4.03	15.50	3.85	18.36	4.56
M154	6.30	29.20	4.64	34.91	5.54
M155	1.10	6.36	5.80	7.78	7.10
M156	11.73	33.78	2.88	39.48	3.37

Modelo	Seguridad de vida			Prevención de colapso	
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad
M157	0.90	5.71	6.38	6.94	7.75
M158	3.01	8.83	2.94	10.33	3.43
M159	2.60	7.92	3.04	9.32	3.58
M160	1.58	6.58	4.16	7.85	4.96
M161	6.07	13.01	2.14	14.82	2.44
M162	12.19	22.41	1.84	25.10	2.06
M163	1.59	6.92	4.34	8.33	5.23
M164	21.16	32.23	1.52	35.13	1.66
M165	2.52	7.80	3.10	9.27	3.68
M166	10.08	19.11	1.90	21.44	2.13
M167	21.00	40.74	1.94	45.83	2.18
M168	2.41	7.94	3.30	9.35	3.89
M169	36.44	56.15	1.54	61.32	1.68
M170	3.40	8.88	2.61	10.31	3.03
M171	4.70	15.77	3.35	18.62	3.96
M172	3.68	9.13	2.48	10.56	2.87
M173	2.38	8.08	3.40	9.51	4.00
M174	6.73	17.75	2.64	20.60	3.06
M175	13.61	35.23	2.59	40.94	3.01
M176	5.26	10.63	2.02	12.06	2.29
M177	22.17	44.10	1.99	49.80	2.25
M178	3.25	8.95	2.75	10.38	3.19
M179	10.50	21.56	2.05	24.41	2.33
M180	21.75	43.91	2.02	49.61	2.28
M181	3.89	9.52	2.44	10.94	2.81
M182	40.91	58.47	1.43	64.17	1.57
M183	1.34	6.82	5.07	8.24	6.13
M184	3.39	14.45	4.26	17.30	5.11
M185	2.76	8.16	2.96	9.59	3.48
M186	1.75	7.32	4.17	8.74	4.98
M187	6.21	17.23	2.77	20.08	3.23
M188	13.04	34.67	2.66	40.37	3.10
M189	1.73	7.31	4.21	8.73	5.04
M190	21.60	43.51	2.01	49.21	2.28
M191	2.76	8.33	3.02	9.76	3.53
M192	10.15	21.21	2.09	24.06	2.37
M193	20.46	43.28	2.12	48.98	2.39
M194	2.66	8.23	3.10	9.66	3.64
M195	36.73	58.39	1.59	64.09	1.74
M196	1.38	7.08	5.13	8.51	6.17
M197	3.71	14.77	3.98	17.62	4.75
M198	2.81	8.22	2.92	9.65	3.43
M199	1.86	7.43	3.98	8.85	4.75
M200	6.34	17.36	2.74	20.21	3.19
M201	13.55	35.17	2.60	40.88	3.02
M202	1.82	7.40	4.06	8.82	4.85
M203	22.00	43.92	2.00	49.62	2.26
M204	2.84	8.41	2.96	9.84	3.46
M205	10.32	21.38	2.07	24.23	2.35
M206	21.69	43.84	2.02	49.55	2.28
M207	2.91	8.50	2.92	9.92	3.41
M208	37.95	58.47	1.54	64.17	1.69

7 CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Mediante un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo, se procedió a obtener la ductilidad del modelo de estudio M209, esto quiere decir que a manera de comprobación de ductilidades, por medio del programa de análisis estructural, Ruaumoko 3D, se obtuvieron las curvas de histéresis de dicho modelo para cinco diferentes sismos, correspondientes a la Zona D (CFE 1993). Al igual que en investigaciones previas, el comportamiento histórico seleccionado es el de Takeda para columnas de concreto reforzado, debido a su alta confiabilidad.

En la tabla 7.1 se observan los sismos elegidos, los cuales en su mayoría corresponden a los mismos seleccionados por Mendoza en el 2014, debido a que es una investigación previa a la presente investigación.

Tabla 7.1. Sismos de análisis

Epicentro	Fecha de registro	Magnitud
Guerrero	14/06/1979	7.0
Michoacán	19/09/1985	8.1
Colima	30/04/1986	7.0
Colima	09/10/1995	8.0
Oaxaca	30/09/1999	7.8

7.1 Acelerogramas

Para obtener el análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo se necesita de los acelerogramas de los sismos presentados en la tabla 7.1, por lo que en la figura 7.1 a 7.5 se presentan los acelerogramas de los sismos de análisis, con los que se obtuvieron las curvas de histéresis del modelo de estudio, para posteriormente obtener la ductilidad por medio de una relación del desplazamiento último entre el desplazamiento de fluencia.

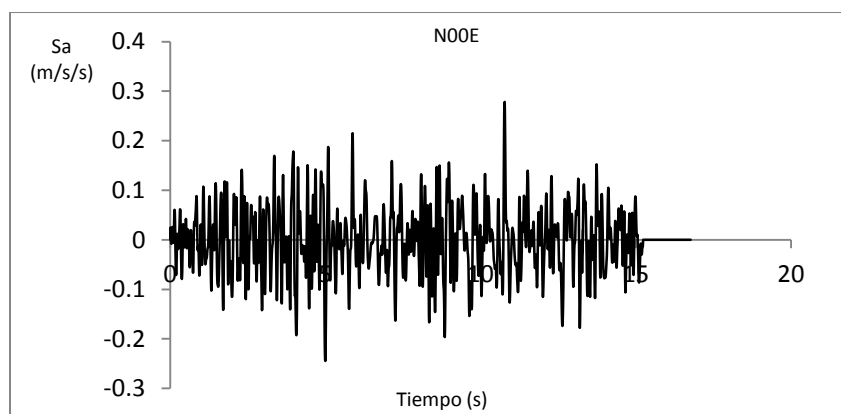


Figura.7.1. Acelerograma del sismo de Guerrero en 1979

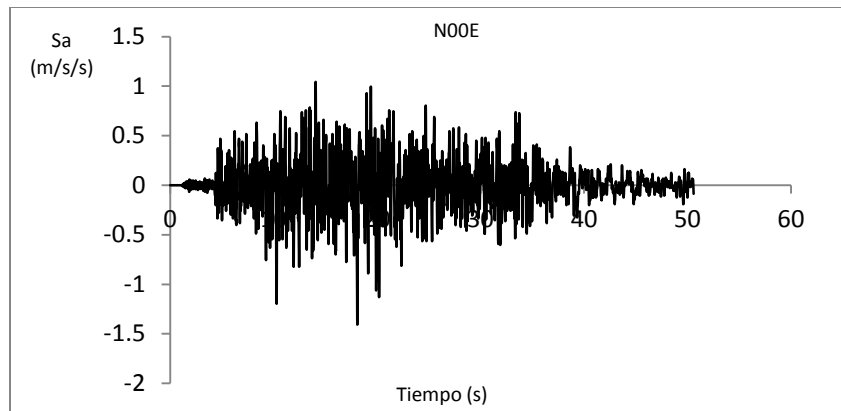


Figura.7.2. Acelerograma del sismo de Michoacán en 1985

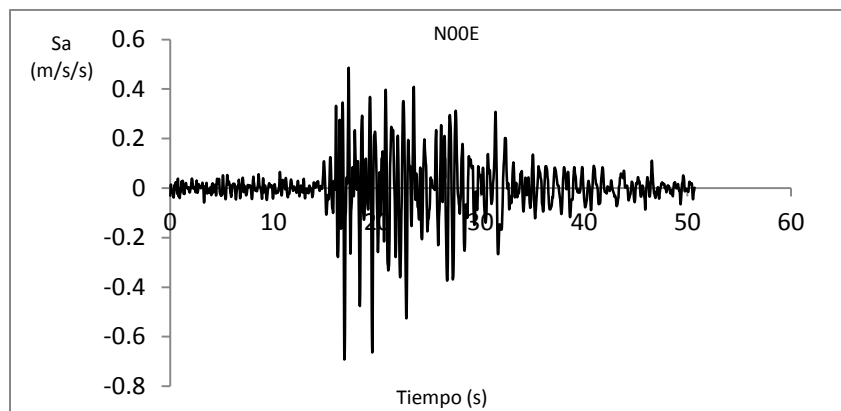


Figura.7.3. Acelerograma del sismo de Colima en 1986

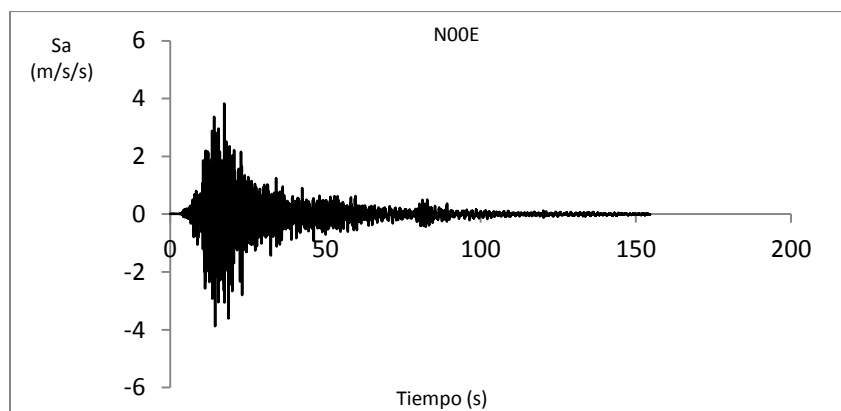


Figura.7.4. Acelerograma del sismo de Colima en 1995

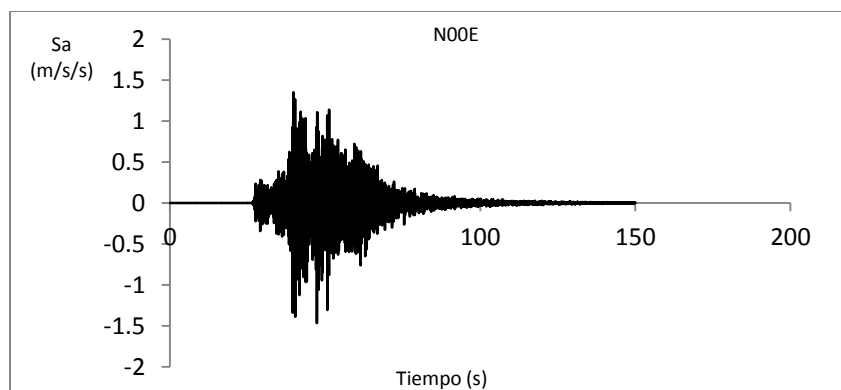


Figura.7.5. Acelerograma del sismo de Oaxaca en 1999

7.1.1 Escalado de los acelerogramas

Por medio del software Degtra v9.0 se procedió a obtener los espectros de respuesta de los acelerogramas descritos anteriormente, dichos espectros de respuesta se pueden observar mediante la figura 7.6, para todos los sismos de análisis.

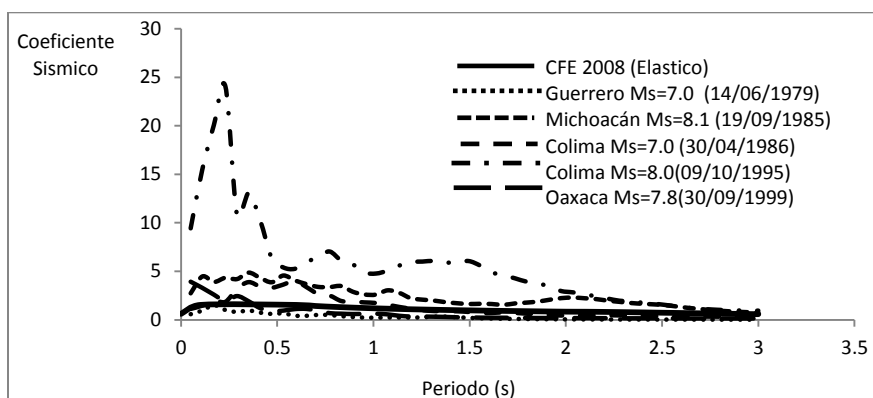


Figura.7.6. Espectros de respuesta de los sismos de análisis.

Mediante el espectro de respuesta *elástico*, con el que se diseñaron las pilas de todos los modelos de análisis, se procedió a escalar los espectros de respuesta en el periodo fundamental del modelo de análisis (M209) con un periodo de 1.221 segundos. En la figura 7.7 a 7.11 se muestran los factores de escala obtenidos para los sismos de estudio.

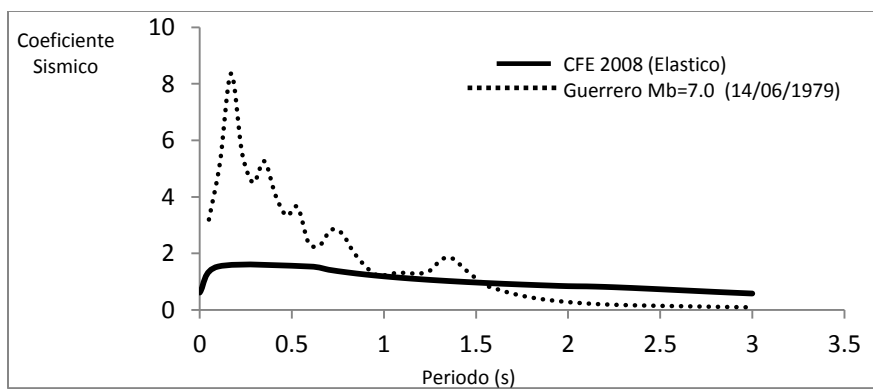


Figura.7.7. Espectro de respuesta *elástico* (línea continua) y espectro de respuesta de Guerrero 1979 (línea punteada) con un factor de escala de 5.5

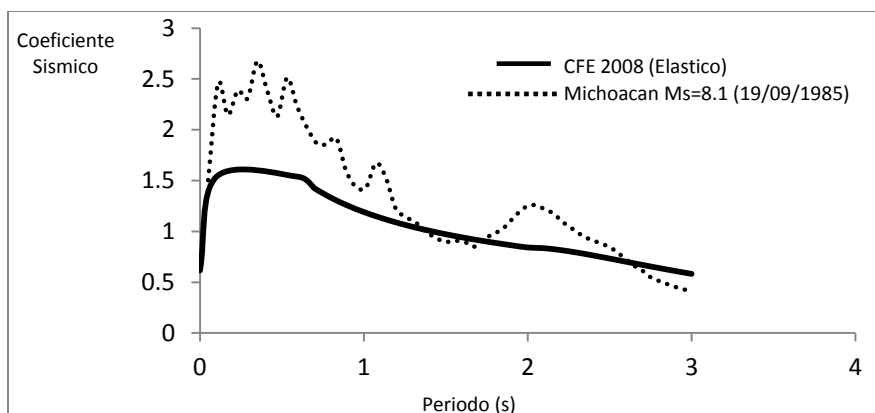


Figura.7.8. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Michoacán 1985 (línea punteada) con un factor de escala de 0.55

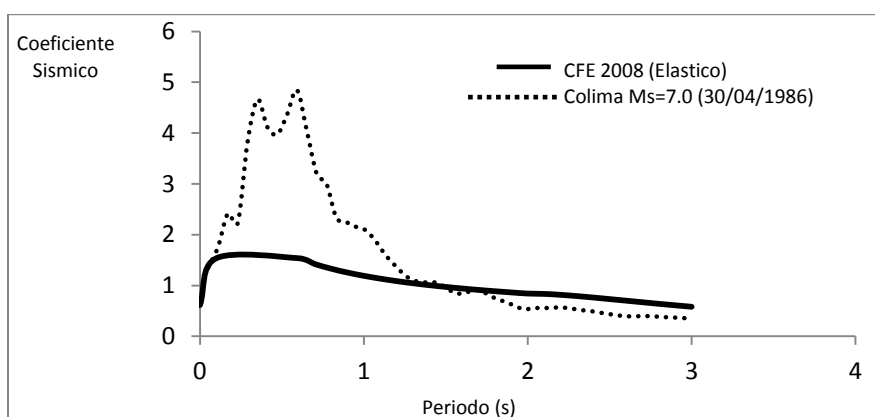


Figura.7.9. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Colima 1986 (línea punteada) con un factor de escala de 1.2

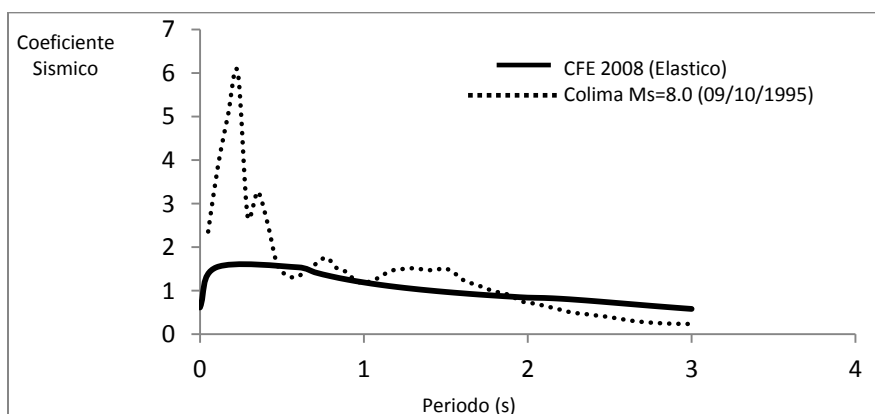


Figura.7.10. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Colima 1995 (línea punteada) con un factor de escala de 0.25

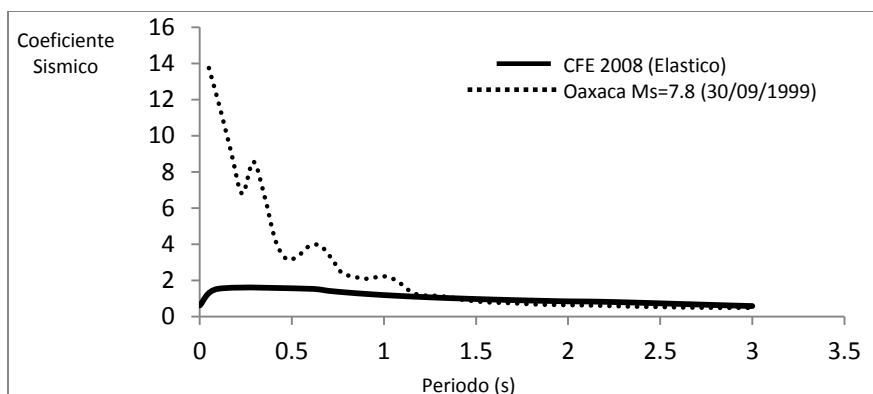


Figura.7.11. Espectro de respuesta elástico (línea continua) y espectro de respuesta de Oaxaca 1999 (línea punteada) con un factor de escala de 3.5

Para comprender mejor los factores de escala obtenidos, por medio de la tabla 7.2 se muestran dichos factores, para los sismos de interés.

Tabla 7.2. Factores de escala

Epicentro	Fecha de registro	Factor de escala
Guerrero	14/06/1979	5.50
Michoacán	19/09/1985	0.55
Colima	30/04/1986	1.20
Colima	09/10/1995	0.25
Oaxaca	30/09/1999	3.50

Con dichos factores que se observan en la tabla anterior 7.2 se escalaron los acelerogramas para los cinco sismos de estudio, para posteriormente realizar el análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo.

7.2 Obtención de las curvas de histéresis

Mediante el programa de análisis estructural Ruaumoko 3D, se obtuvieron las curvas de histéresis del modelo de estudio, con los acelerogramas ya afectados por un factor de escala, donde por medio de la figura 7.12 se puede observar el modelo de estudio en el software de análisis.

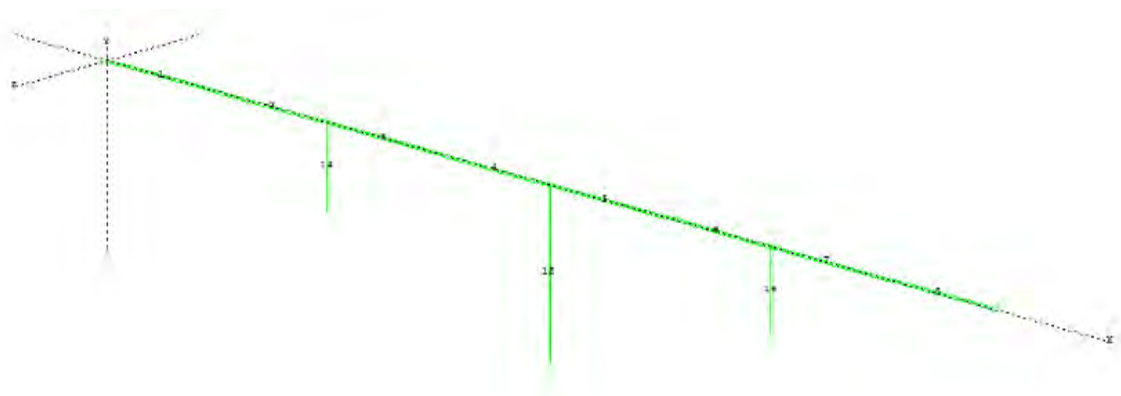


Figura.7.12. Modelo de estudio, en el programa de análisis estructural, Ruaumoko 3D.

Para tener la certeza de que se hizo un buen modelado, en el programa Ruaumoko 3D, se compararon los periodos obtenidos en el programa de análisis estructural SAP2000, con el periodo obtenido en el programa de análisis estructural Ruaumoko 3D, dando como resultado lo que se observa en la tabla 7.3.

Tabla 7.3. Periodos fundamentales obtenidos con SAP200 y Ruaumoko 3D, del modelo M209.

Modelo	Periodo fundamental obtenido en SAP2000 (seg)	Periodo fundamental obtenido en Ruaumoko 3D (seg)
M209	1.202	1.221

Posteriormente mediante el sub programa de Ruaumoko 3D, llamado Dynaplot se procedió a obtener las curvas de histéresis para los acelerogramas escalados descritos anteriormente. En la figura 7.13 a 7.17 se observan las curvas de histéresis del modelo de estudio, para los cinco sismos de análisis, propuestos en la tabla 7.2.

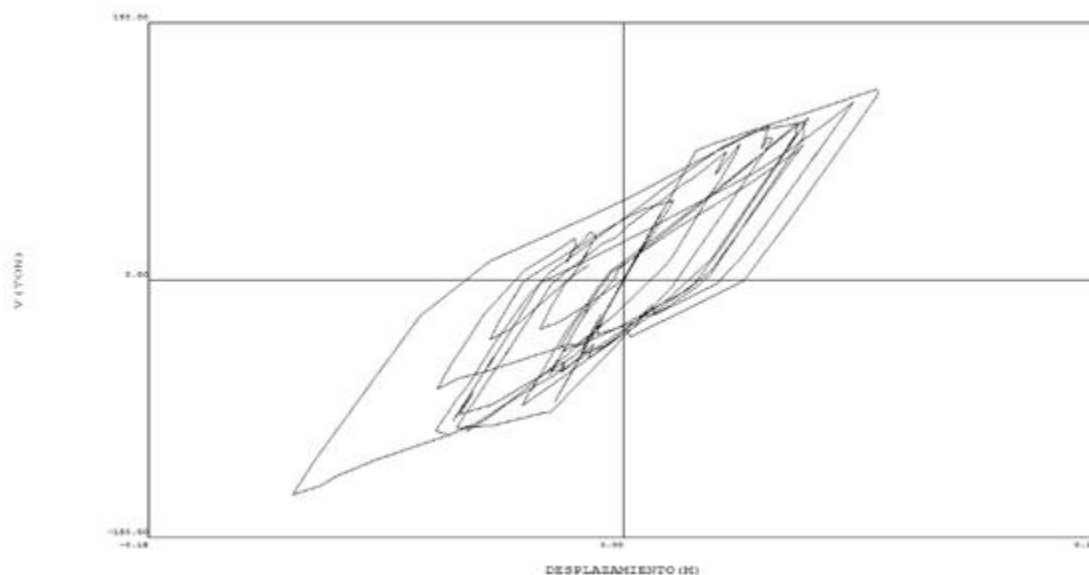


Figura.7.13. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Guerrero 1979

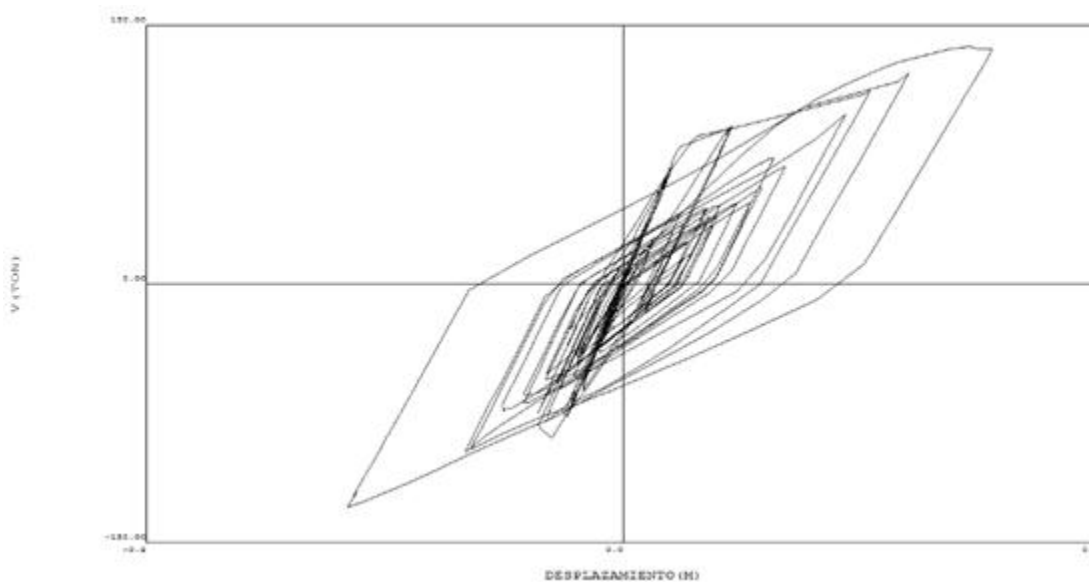


Figura.7.14. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Michoacán 1985

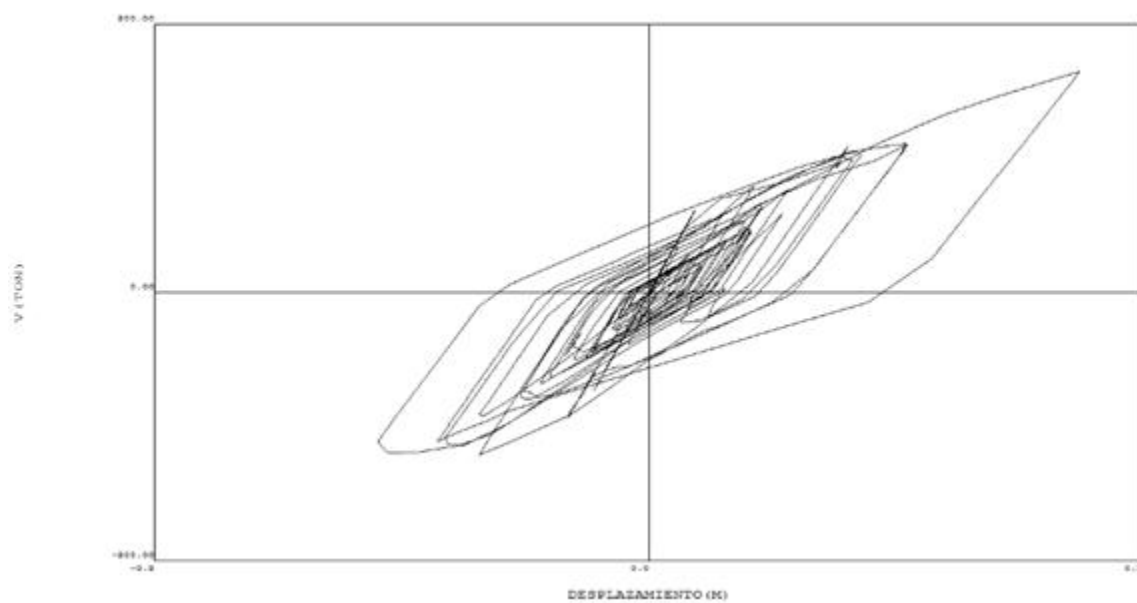


Figura.7.15. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Colima 1986

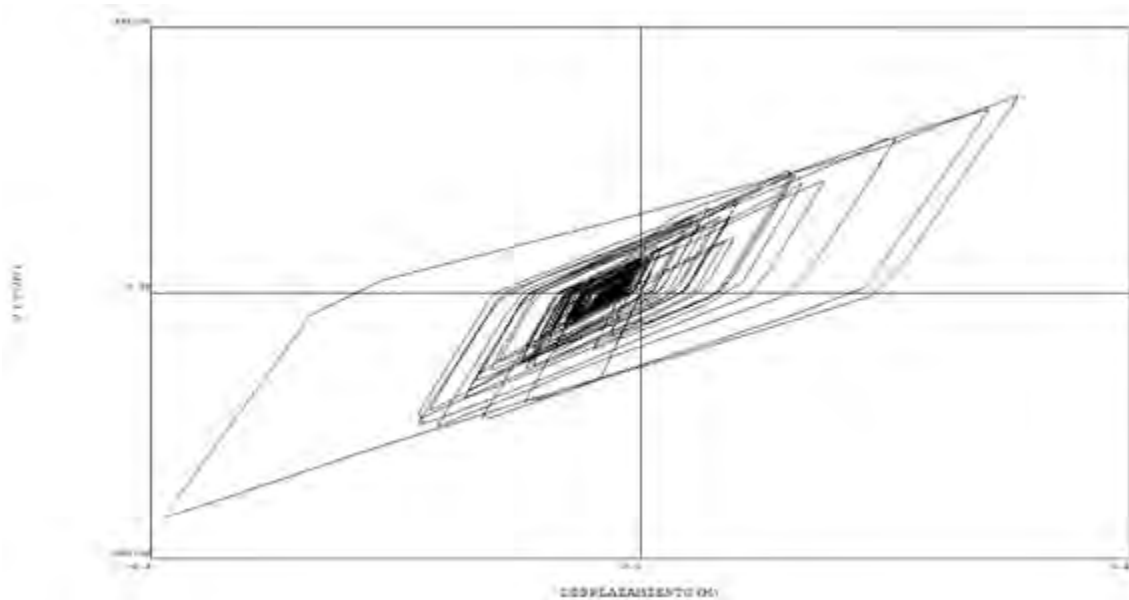


Figura.7.16. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Colima 1995

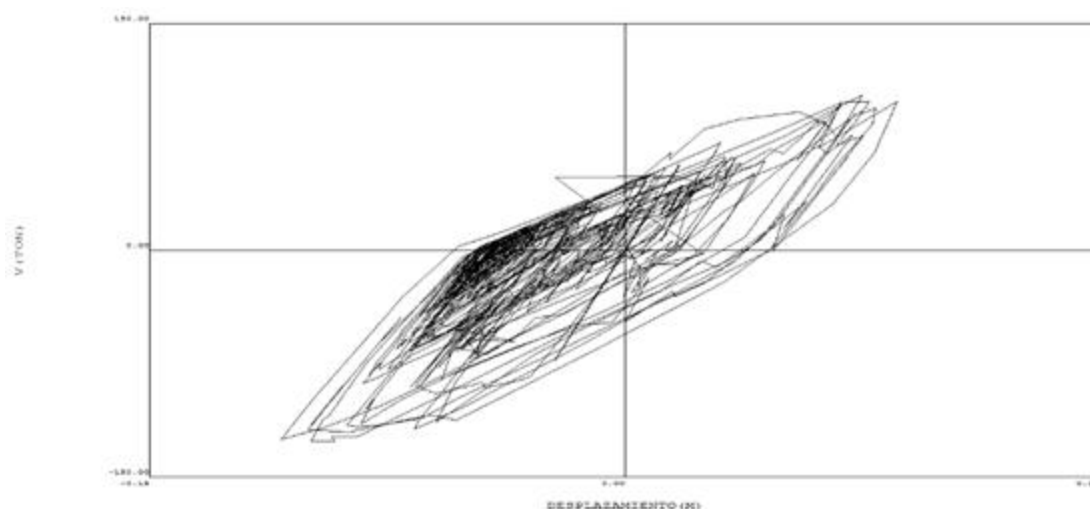


Figura.7.17. Curva de histéresis del modelo M209 para el sismo de Oaxaca 1999

7.3 Ductilidades obtenidas del modelo de estudio

Los valores de ductilidad obtenidos a partir de las curvas de histéresis, se observan mediante la tabla 7.4, donde la ductilidad del modelo de estudio, se expresa como el promedio de las ductilidades obtenidas para los cinco sismos propuestos.

Tabla 7.4. Desplazamientos y ductilidades en la dirección longitudinal y transversal de análisis, por medio de un análisis paso a paso en el tiempo para el modelo M209

Sismo	Ductilidades			
	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)	Ductilidad Longitudinal	Ductilidad Transversal
Guerrero +	3.00	9.00	3.00	3.00
Guerrero -	3.70	10.20	2.76	2.76
Michoacán +	4.00	12.00	3.00	3.00
Michoacán -	5.00	13.50	2.70	2.70
Colima 1 +	5.00	14.50	2.90	2.90
Colima 1 -	4.50	14.00	3.11	3.11
Colima 2 +	3.50	16.50	4.71	4.71
Colima 2 -	4.50	15.00	3.33	3.33
Oaxaca +	5.50	12.50	2.27	2.27
Oaxaca -	3.50	11.00	3.14	3.14
Promedio			3.09	3.09

Mediante la tabla 7.5, se presenta una comparación de las ductilidades obtenidas, para los modelos con igualdad de propiedades y características tal y como se observa en la tabla 3.3, pero con diferente análisis no lineal, donde el modelo M140 es representado por un análisis estático no lineal para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, mientras que el modelo M209 es representado por un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo.

Tabla 7.5. Ductilidades en la dirección longitudinal y transversal de análisis, por medio de un análisis estático no lineal (M140) y un análisis paso a paso en el tiempo (M209)

Modelo	Seguridad de vida	Prevención de colapso
	<i>Ductilidad longitudinal y transversal</i>	<i>Ductilidad longitudinal y transversal</i>
M140	2.10	2.39
M209	3.09	3.09

Por medio de la tabla 7.5, se puede observar que el FEMA 356 es conservador en las rotaciones que propone para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, ya que las ductilidades obtenidas del modelo de análisis, mediante un análisis estático no lineal, son menores con respecto a las ductilidades obtenidas a través un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo, además de que dichas ductilidades son menores a las que marcan los reglamentos de diseño de puentes para este caso de estudio.

8 CONCLUSIONES

Mediante análisis estáticos no lineales, se obtuvieron las curvas de capacidad de 208 modelos de puentes carreteros de concreto reforzado (M001 a M208), para observar la influencia en ductilidad de las pilas de puente, bajo distintos parámetros que pueden afectar dicha ductilidad. Anexo a este trabajo de investigación se realizó un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo, a un modelo de estudio (M209), únicamente a manera de comprobación de resultados. Los parámetros elegidos en el presente trabajo de investigación son:

- Variación de alturas de las pilas: Esto significa que se modelaron puentes con una diferencia entre alturas de pilas de 0.5, esto quiere decir que la pila central tiene el doble de altura que las pilas de los extremos para todos los casos de estudio, además se propusieron puentes con pilas cortas, pilas intermedias y pilas altas. Para los puentes con pilas cortas se manejaron alturas para la pila central de 10 metros de altura y para las pilas de los extremos de 5 metros de altura, mientras que para los puentes con pilas intermedias se manejaron alturas de 20 metros para la pila central y de 10 metros para las pilas de los extremos, y por último para los puentes con pilas altas se asignaron alturas de 40 metros para la pila central y de 20 metros para las pilas de los extremos.
- Número de pilas por eje: Los distintos reglamentos de diseño de puentes manejan factores de ductilidad para pilas únicas por eje y para múltiples pilas por eje, en este trabajo de investigación dicha variante se maneja por medio de una pila individual por eje para representar las pilas únicas, y tres pilas por eje para representar las múltiples pilas por eje.
- Forma de la sección transversal: Para la presente investigación se propusieron tres diferentes tipos de sección transversal en pilas de puente (pila tipo muro, pila de sección oblonga y pila circular hueca), anexo a esta investigación se decidió incluir otro tipo de sección transversal, debido a que en el diseño de múltiples pilas por eje las dimensiones de las secciones tipo muro se reducían bastante por lo que se decidió llamarla pila rectangular maciza, aunque se desprende del diseño de las pilas tipo muro.
- Cuantía de acero longitudinal: En la actualidad existen puentes que por su antigüedad o múltiples razones, pueden llegar a tener un mal diseño de la cantidad de refuerzo longitudinal, por lo que en el presente trabajo de investigación se propusieron tres niveles de cuantía de refuerzo longitudinal (Sobre refuerzo, buen refuerzo y escaso refuerzo).
- Confinamiento de acero transversal: Para tomar en cuenta esta variante en las pilas de puente carretero común, se propusieron dos casos de estudio (Buen confinamiento transversal y mal confinamiento transversal). Dicho comportamiento se dio por medio de las rotaciones que recomienda el FEMA 356 para columnas de concreto reforzado.
- Rigidez efectiva: Mediante este parámetro se observara la importancia de agrietar, o no agrietar la sección gruesa de vigas y pilas, en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente, conforme a las recomendaciones que marcan los distintos códigos de diseño, para el caso particular de esta investigación mediante el FEMA 356.
- Efectos $P-\Delta$: Mediante la no linealidad en el análisis estático no lineal, se le asignaron a algunos modelos de estudio, los llamados efectos $P-\Delta$ para así observar las afectaciones de dichos efectos, a la ductilidad que desarrollan las pilas de puente carretero común.
- Interacción suelo estructura: Para determinar en que afecta la interacción suelo estructura, a las pilas de puente carretero común en términos de ductilidad, se asignaron tres tipos de suelo (suelo blando, suelo intermedio y suelo duro), por lo que mediante el diseño de las distintas cimentaciones y obteniendo las propiedades de los tres tipos de suelo, se procedió a obtener las funciones de impedancia, obteniendo así las rigideces y los amortiguamientos de los casos de estudio, y mediante un modelado no lineal, por medio de resortes traslacionales y rotacionales se le imprimió el grado de interacción suelo- estructura a los modelos utilizados bajo este parámetro.

Por medio de las curvas de capacidad y de las ductilidades obtenidas, se plantearon conclusiones de los modelos de puentes carreteros analizados, en este trabajo de investigación.

8.1 Conclusiones

- Para puentes con pilas de menor longitud, la rigidez y resistencia son mayores pero el desplazamiento último es menor que para puentes con pilas de mayor altura, por lo que, entre mayor sea la altura de la pila, menor será la ductilidad que desarrolle, aunque llega un punto, que entre más altas sean las pilas, las ductilidades obtenidas se van igualando.
- En puentes con pilas cortas, con múltiples pilas por eje, la ductilidad es muy similar, que para puentes con pilas únicas por eje, mientras que para los casos con pilas altas, los puentes con múltiples pilas, desarrollan menos ductilidad que los casos con pila única por eje.
- Las pilas que alcanzan una mayor rigidez y resistencia son las pilas de sección circular hueca en la dirección longitudinal de análisis.
- Para la dirección transversal, las pilas que alcanzan una mayor rigidez y resistencia son las pilas de sección tipo muro.
- Para puentes con pilas únicas por eje, en la dirección longitudinal de análisis, las ductilidades más grandes se presentaron en las pilas de sección circular hueca, mientras que la menor ductilidad se dio en las pilas de sección tipo muro.
- Para puentes con pilas únicas por eje, en la dirección transversal de análisis, las ductilidades más grandes se presentaron en las pilas tipo muro, mientras que la menor ductilidad se dio en las pilas de sección circular hueca.
- Para puentes con múltiples pilas, en la dirección longitudinal de análisis, la mayor ductilidad se desarrolló en las pilas de sección circular hueca, mientras que la menor ductilidad se dio en las pilas de sección rectangular maciza.
- Para puentes con múltiples pilas, en la dirección transversal de análisis, la mayor ductilidad se desarrolló en las pilas de sección oblonga, mientras que la menor ductilidad se dio en las pilas de sección rectangular maciza.
- Un buen detallado no sólo se refiere a colocar una cuantía de acero adecuada, sino a distribuirla correctamente.
- En general las pilas con un grado de sobre refuerzo longitudinal desarrollan una menor ductilidad, mientras que las pilas con un grado de escaso refuerzo longitudinal son las que presentan una mayor ductilidad aunque en varios casos estas últimas fallaran a flexo-compresión.
- El acero transversal tiene un gran impacto en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente, en algunos casos la diferencia entre un buen confinamiento y un mal confinamiento de acero transversal se verá reflejado en más del doble de ductilidad para un buen confinamiento.
- Las pilas con la sección agrietada presentan una menor rigidez y resistencia, además de una menor ductilidad, que las pilas sin la sección agrietada, en muchos casos hasta con una diferencia del 50% en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente.
- Las pilas donde se toman en cuenta los efectos $P-\Delta$ presentan una menor pendiente post-fluencia, además de que los desplazamientos últimos y ductilidades son menores con respecto a los modelos sin considerar los efectos $P-\Delta$.
- Para puentes con pilas únicas por eje, la mayor afectación debido a los efectos $P-\Delta$ se da en las pilas con sección tipo muro.
- Para puentes con múltiples pilas por eje la mayor afectación debido a los efectos $P-\Delta$ se da en las pilas con sección oblonga.
- La interacción suelo estructura, modifica el comportamiento de las estructuras de puente.
- Entre más blando es el suelo, más rígida se comporta la estructura de puente.
- La interacción suelo estructura modifica los desplazamientos de las estructuras de puente, esto es que entre más blando es el suelo, los desplazamientos máximos son mayores.

- La interacción suelo estructura modifica la ductilidad de las pilas puente, esto es que las pilas de puente con interacción suelo estructura presentan una menor ductilidad que las pilas de puente en base empotrada.
- Para los puentes con interacción suelo estructura la cimentación tiene gran repercusión en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente, esto es que los puentes desplantados en suelo intermedio, pero con cimentación mixta a base de zapatas con pilotes de cimentación, tienen una mayor ductilidad, que los puentes en suelo duro, pero con cimentación únicamente a base de zapatas, dicho comportamiento se dio en la mayoría de los puentes de estudio.
- Para pilas únicas y pilas múltiples por eje, la mayor afectación en ductilidad por los efectos de la interacción suelo estructura, se dio en las pilas de sección circular hueca en la dirección longitudinal de análisis.
- Para pilas únicas por eje la mayor afectación en ductilidad por efectos de interacción suelo estructura se dio en las pilas tipo muro en dirección transversal de análisis.
- Para múltiples pilas por eje, la mayor afectación en ductilidad por efectos de interacción suelo estructura para modelos de pilas cortas se da en las pilas con sección oblonga, mientras que para pilas altas se da en las pilas de sección circular hueca en dirección transversal de análisis.
- Se recomienda un buen armado de acero longitudinal y transversal de las pilas, para obtener un buen comportamiento de la estructura en su conjunto, tanto en la resistencia que desarrolle, como en la capacidad de deformación que obtenga, además de evitar fallas por flexo-compresión.
- El FEMA 356 es conservador en las rotaciones que propone para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso, ya que las ductilidades obtenidas del modelo de análisis, mediante un análisis estático no lineal (M140), son menores con respecto a las ductilidades obtenidas a través un análisis dinámico no lineal o paso a paso en el tiempo (M209)
- En algunos casos se obtuvieron ductilidades mayores a los valores máximos que recomiendan los reglamentos de diseño.
- Existen algunas variantes, como las presentadas en este trabajo de investigación, con las que se podría presentar una ductilidad mayor a las que recomiendan los distintos códigos de diseño, por lo que es un factor a tomar en consideración.

8.2 Futuras líneas de investigación

- Considerar concretos de alta resistencia en la ductilidad que desarrollan las pilas de puente.
- Se podría complementar el trabajo de investigación considerando los efectos en ductilidad de disipadores energéticos (amortiguadores viscosos), en pilas de puentes carreteros comunes.
- Considerar puentes más extensos o continuos, para observar la ductilidad que desarrollan las pilas, en este tipo de puentes.
- Sería interesante observar los efectos en ductilidad de las pilas, en puentes de dos niveles.
- Realizar análisis más detallados a las pilas de puente, como puede ser elementos finitos.
- Elaborar estudios de ductilidad a puentes carreteros de acero.

9 REFERENCIAS

- AASHTO, *Standard specifications for highway bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
- AASHTO , *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- AASHTO, *Guide specifications for LRFD seismic bridge design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.
- AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- Bae, S. y O. Bayrak, “Seismic performance of reinforced concrete columns: P- Δ effect”, Special publication, pp: 61-80, 2006.
- Dávalos Chávez, D. “Influencia de la interacción suelo estructura en el comportamiento no lineal de marcos de acero con y sin contraviento”, Tesis de maestría, Posgrado en Estructuras, Universidad Autónoma Metropolitana, 2013.
- González Cuevas, O. M. y F. Robles, “Aspectos fundamentales del concreto reforzado”, segunda edición, Ed. Limusa, 1986.
- Farantakis S., A. Kotsoglou y S. Pantazopoulou. “Exploiting SSI to mitigate seismic demands in bridge piers”, *Frontiers of Earthquake Engineering*, Décima Conferencia Nacional de Estados Unidos sobre Ingeniería Sísmica, 2014.
- FEMA, Federal Emergency Management Agency (FEMA 356), November 2000.
- Caltrans, *California Department of Transportation*. Seismic Design Criteria (SDC), Versión, 1.6, Noviembre 2010.
- Fernández Sola L. “Influencia de la interacción dinámica suelo estructura en la respuesta dinámica de las estructuras”, *Construcción y tecnología en concreto*, 20-23, 2013.
- Fernández-Sola, L. R. y Avilés-López J. “Efectos de Interacción Suelo estructura con planta baja blanda”. *Revista ingeniería sísmica*, No 79, 71-90, 2008.
- Guirguis J. E. B. y S. S. F. Mehanny. “How effective are EC8 and recommended AASHTO-LRFD criteria for regular seismic behavior of ductile bridges with unequal height piers?”, 15 World Conference Earthquake Engineering, Lisboa, 2012.
- Martínez Galindo, G. “Participación de la interacción suelo estructura en la respuesta dinámica de marcos con disipadores de energía histeréticos”, Tesis de maestría, Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, 2014.
- Fernández S. y Dávalos C. “Influencia de la interacción dinámica suelo estructura en el comportamiento estático no lineal de marcos de acero con y sin contraviento”, Tesis de maestría, Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, 2013.
- Fernández S. y Martínez G. “Participación de la interacción dinámica suelo estructura en la respuesta dinámica de marcos con disipadores de energía histeréticos”, Tesis de maestría, Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, 2014.
- MDOC, *Manual de Obras Civiles de Diseño por Sismo*, Comisión Federal de Electricidad (CFE) e Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), 2008.

- Mendoza, C. J., C. Aire y A. Fuentes, "Concretos de alta resistencia, fabricados con materiales comunes en el Distrito Federal", Informe Preliminar para la Dirección General de Obras, Departamento del Distrito federal, junio de 1991.
- Mendoza García, G. "Cálculo de ductilidad en pilas de concreto reforzado de puentes comunes", Tesis de maestría, Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, 2014.
- NTC-DF, *Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal*, Gaceta Oficial, 2004.
- Restrepo, J., F. Seible, B. Stephan, y M. N. Schoettler, "Seismic testing of bridges columns incorporating high performance materials". ACI Structural Journal. No. 103-S52, pp: 496-504, 2006.
- Rodríguez, M, y J. C. Botero. "Comportamiento sísmico de estructuras considerando propiedades mecánicas de aceros de refuerzo mexicanos", Revista ingeniería sísmica N° 49, 39-50, 1995.
- Avilés J y L E Pérez-Rocha, "Soil-structure interaction in yielding systems", Earthq. Engng. Struct. Dynam., 32, 1749-1771, 2003.
- Ruiz, G., J. R. Del Viso y J. R. Carmona, "Caracterización de la ductilidad y del comportamiento mecánico a velocidad de deformación variable de hormigones de alta resistencia", Anales de Mecánica de la Fractura Vol. I, 251-256, 2006.
- Sordo Zabay, "Notas de diseño de cimentaciones", Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, 2013.
- Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rate, Scott, B. D., R. Park, & M. J. N. Priestley, ACI Journal, No. 79-2, 13-27, 1982.
- SCT, "Proyectos de nuevos puentes y estructuras similares", Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Documento N.PRY.CAR.6.01.005/01, Sismo, 2005.
- Sozen, H. J, Moehle. "Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement", ACI Structural Journal, No. 103-S85, 842-849, 2006.
- Tamez González, E. "Ingeniería de cimentaciones; conceptos básicos de la práctica", TGC, 2001.
- Tena Colunga Arturo. "Análisis de estructuras con métodos matriciales". Limusa, 2007.
- Terán Gilmore A., "Notas de diseño sismo resistente", Posgrado en ingeniería estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, 2015.
- Takeda, T., Sozen, M.A., and Nielsen, M.N. Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, 96(ST12), 2557-2573, 1970.
- Zahn, F.A., Park, R., and Priestley, M.J.N., Design of Reinforced Concrete Bridge Columns for Strength and ductility, Report 86-7, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1986.

APÉNDICE A. CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS

A.1 Introducción

En el presente apéndice se muestran las curvas de capacidad obtenidos mediante un análisis estático no lineal para todos los modelos de análisis, junto con los desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso según las recomendaciones del FEMA 356 para columnas de concreto reforzado.

A.2 Curvas de capacidad de los modelos de análisis en dirección longitudinal

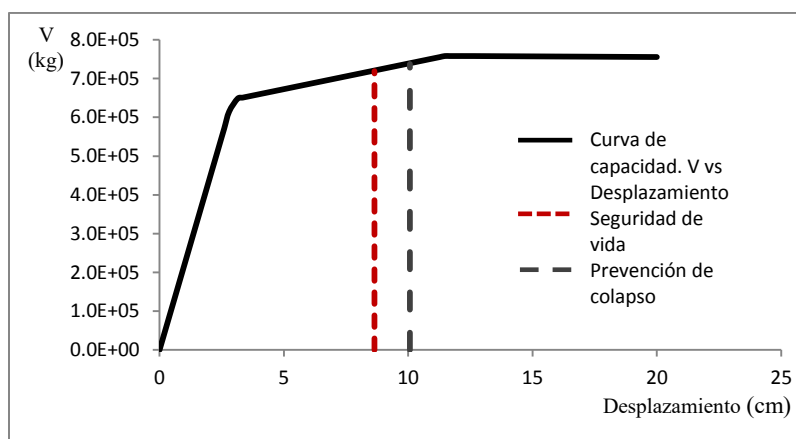


Figura.A.2.1. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M118

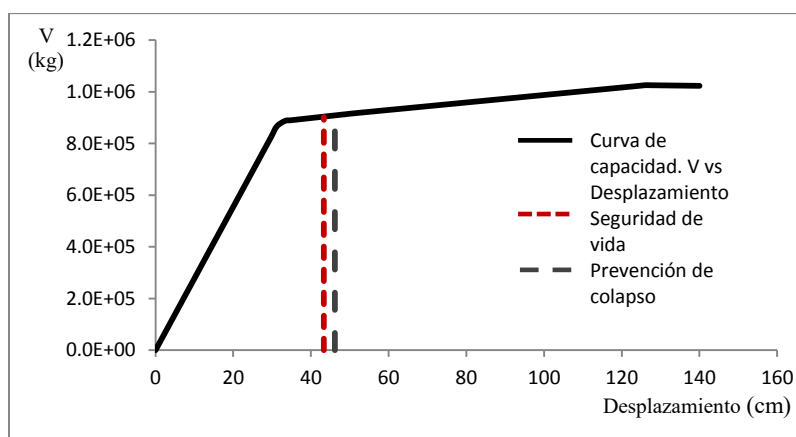


Figura.A.2.2. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M119

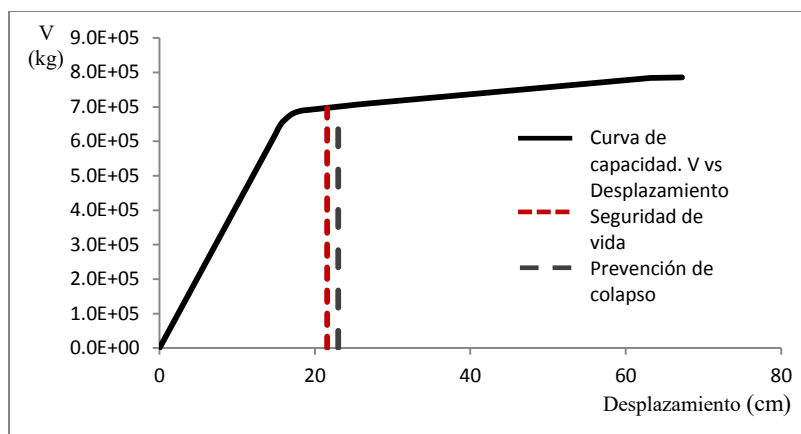


Figura.A.2.3. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M120

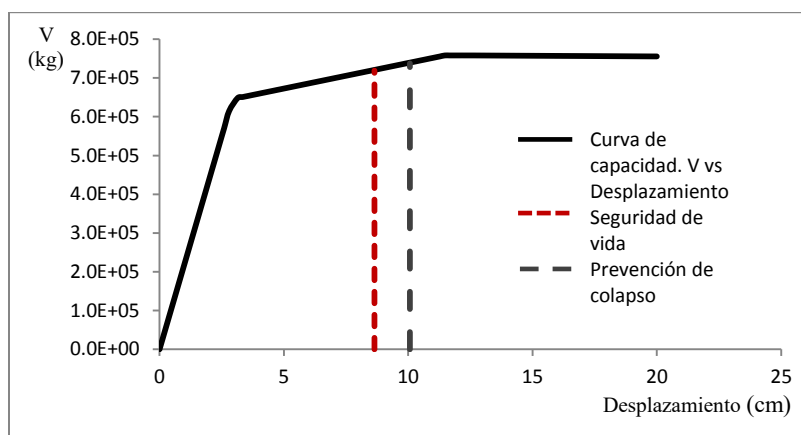


Figura.A.2.4. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131

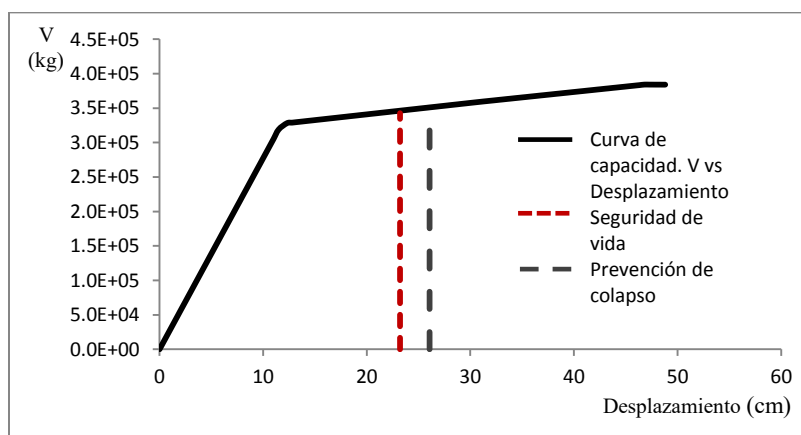


Figura.A.2.5. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132

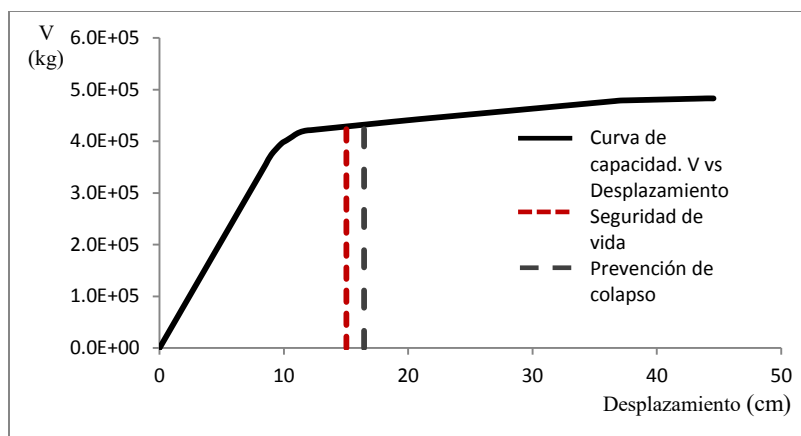


Figura.A.2.6. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M133

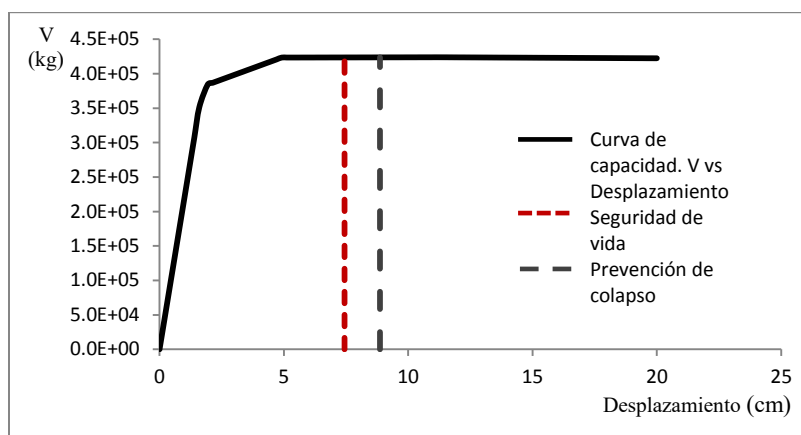


Figura.A.2.7. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M144

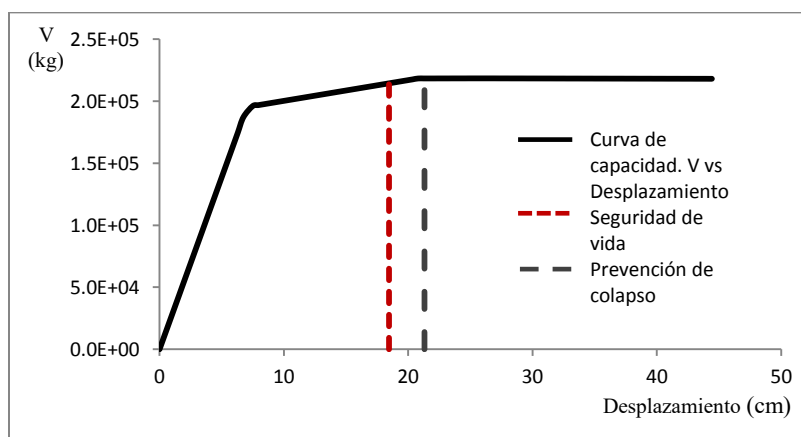


Figura.A.2.8. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M145

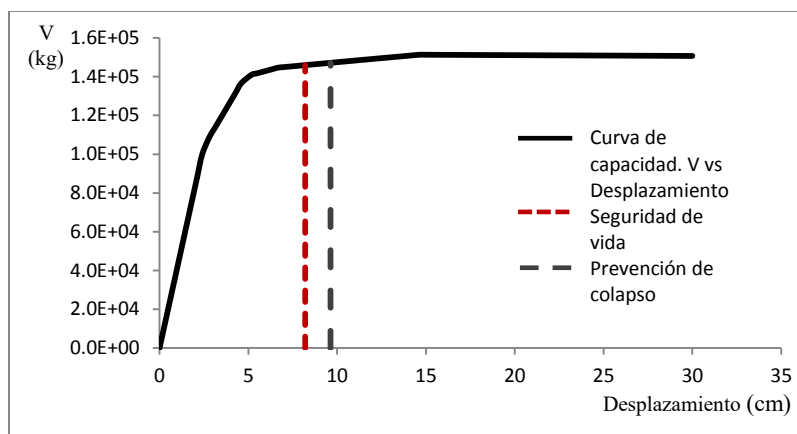


Figura.A.2.9. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M146

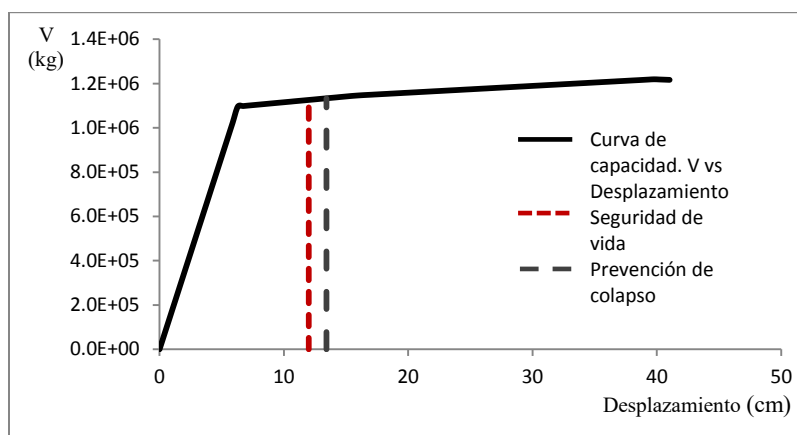


Figura.A.2.10. Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M121

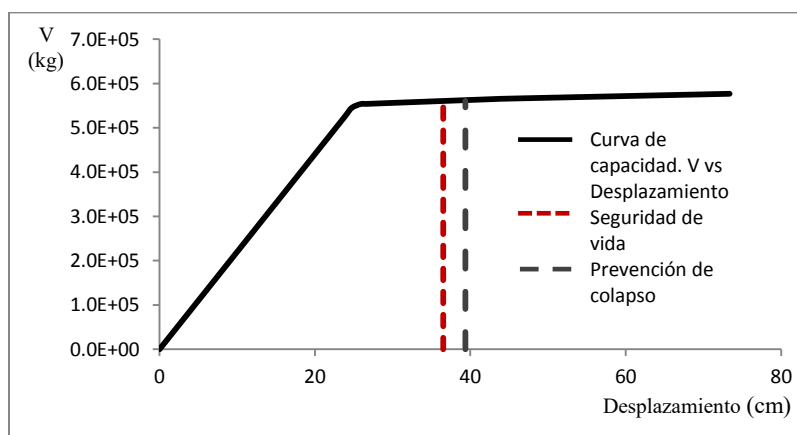


Figura.A.2.11 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M122

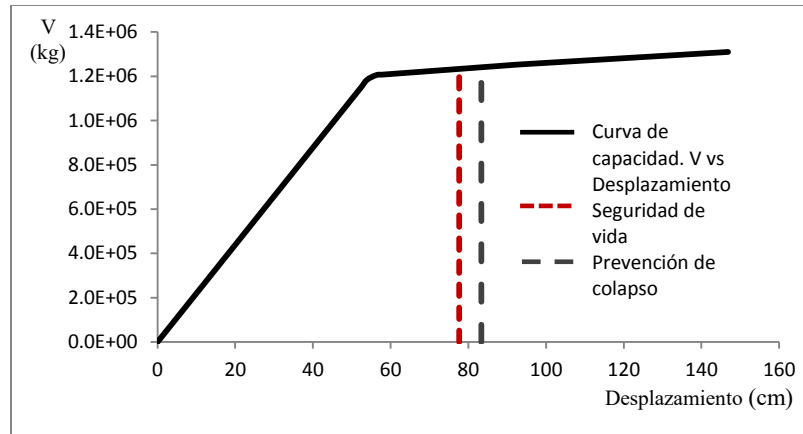


Figura.A.2.12 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M123

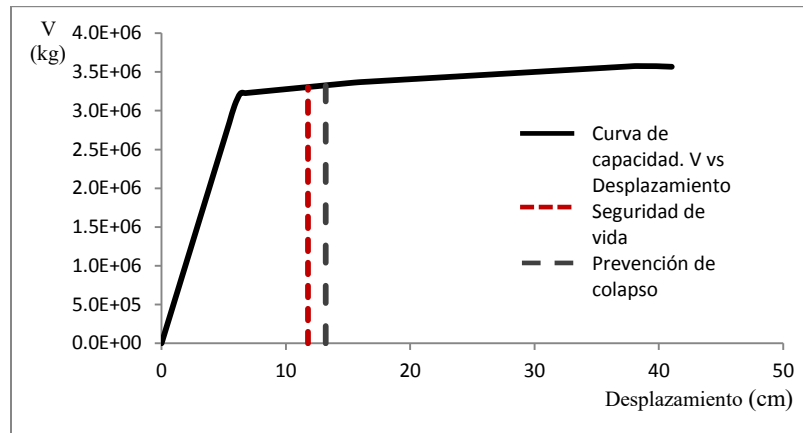


Figura.A.2.13 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M124

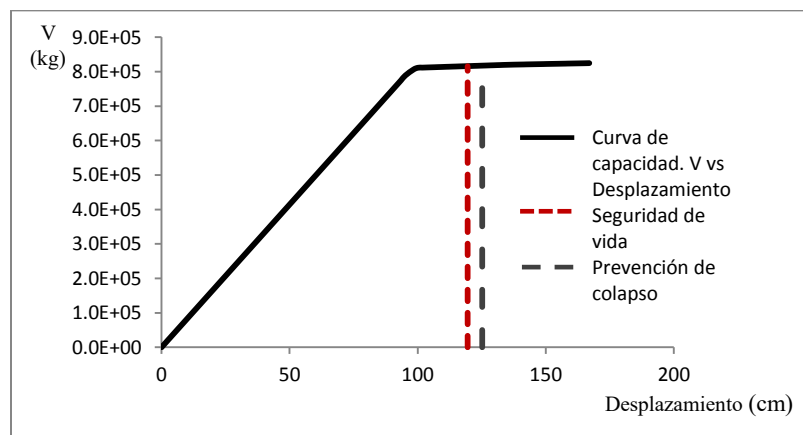


Figura.A.2.14 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M125

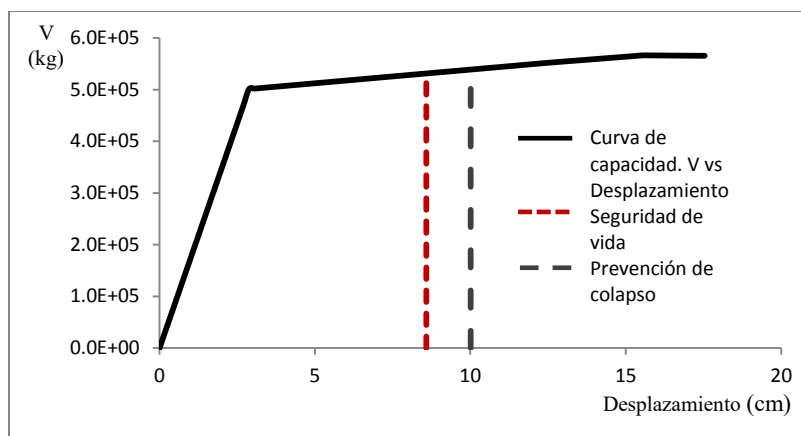


Figura.A.2.15 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134

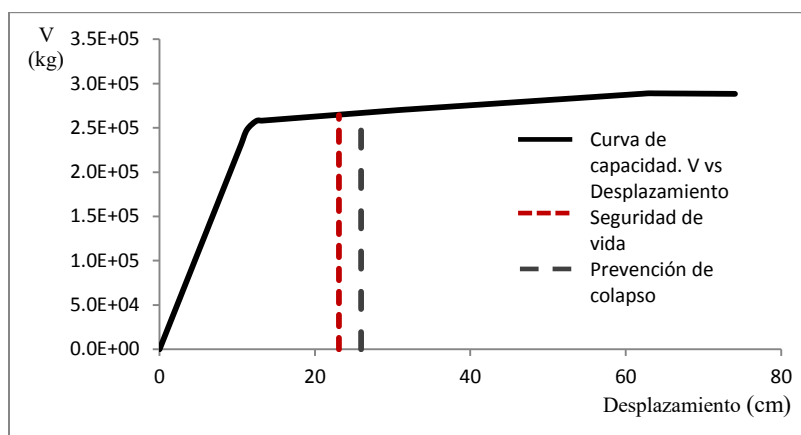


Figura.A.2.16 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M135

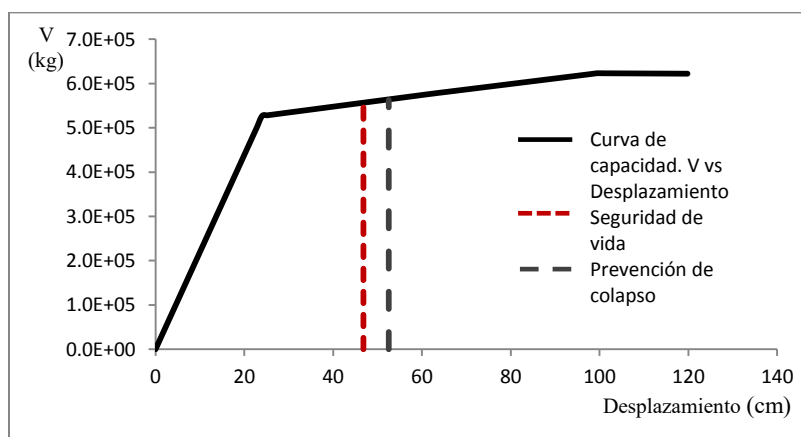


Figura.A.2.17 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M136

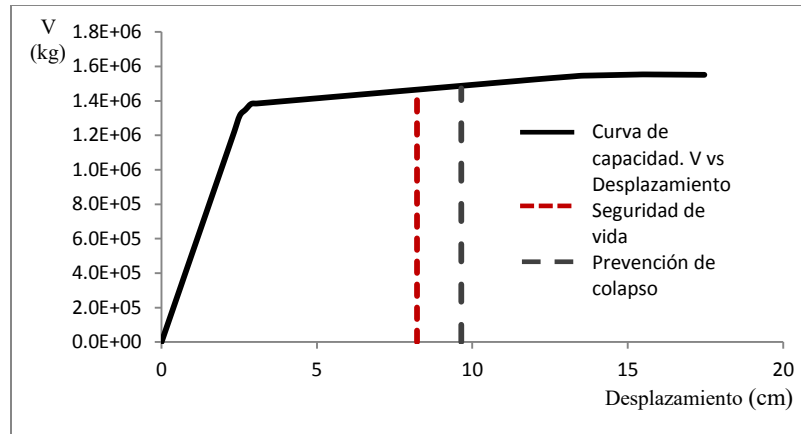


Figura.A.2.18 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M137

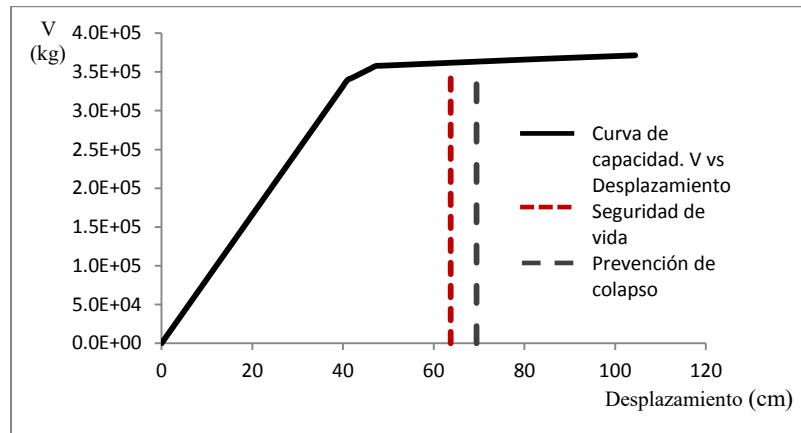


Figura.A.2.19 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M138

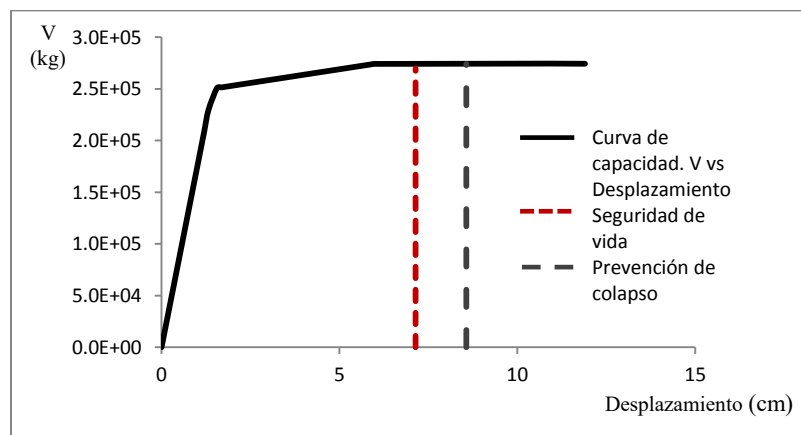


Figura.A.2.20 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M147

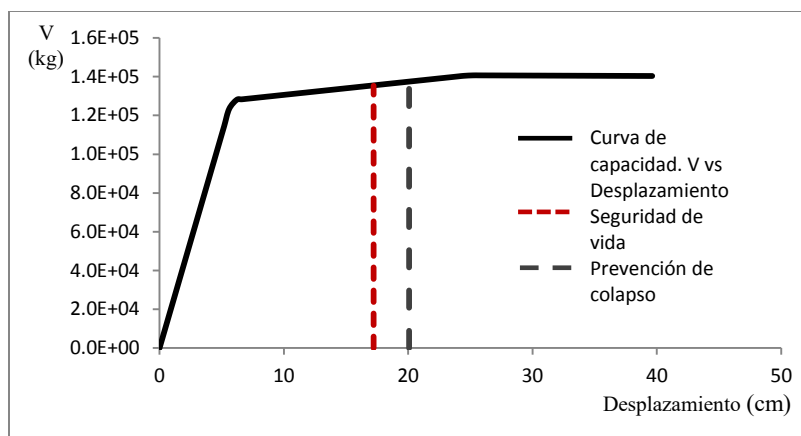


Figura.A.2.21 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M148

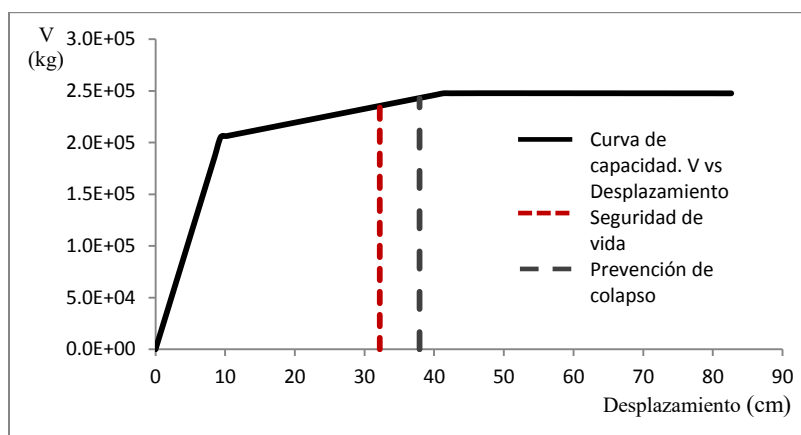


Figura.A.2.22 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M149

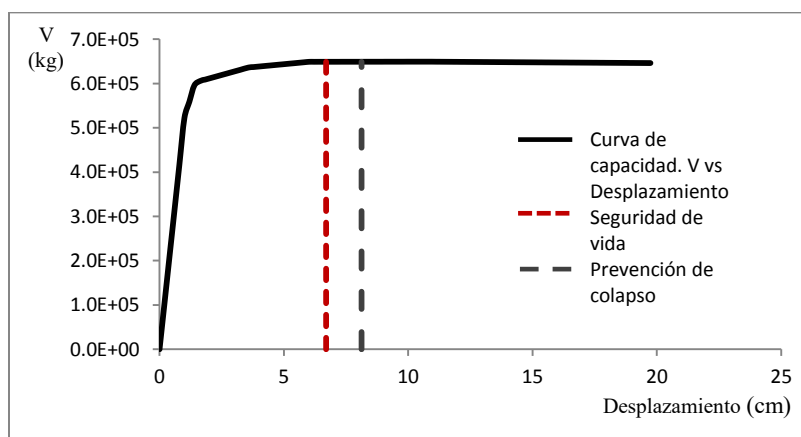


Figura.A.2.23 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M150

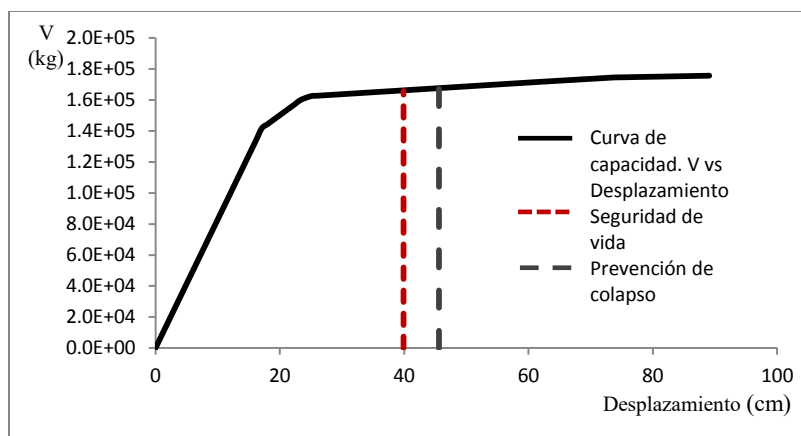


Figura.A.2.24 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M151

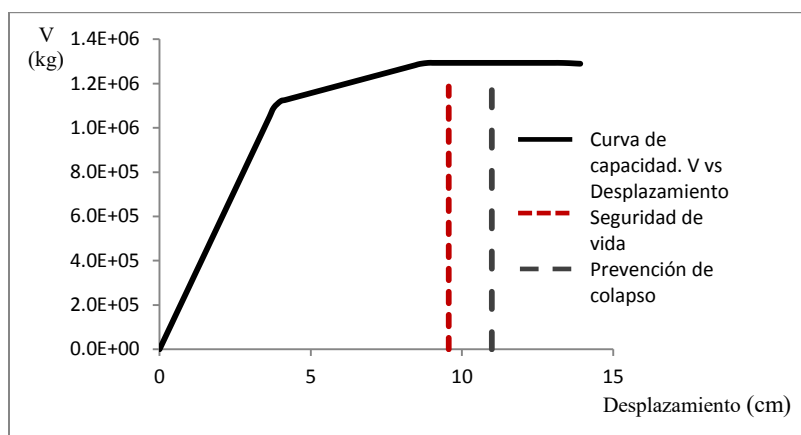


Figura.A.2.25 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M126

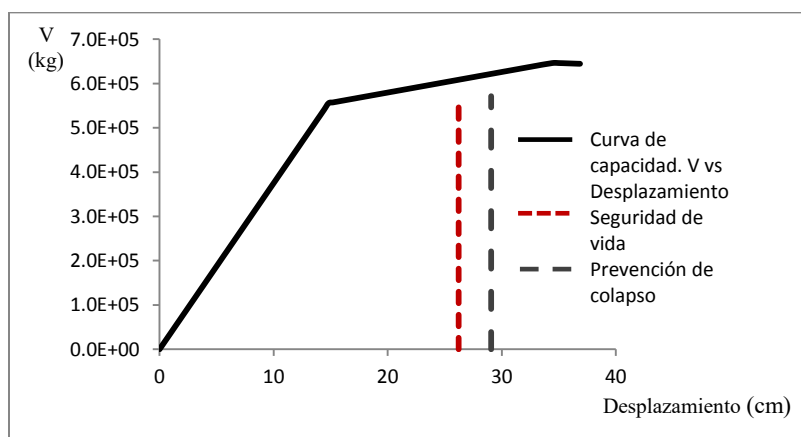


Figura.A.2.26 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M127

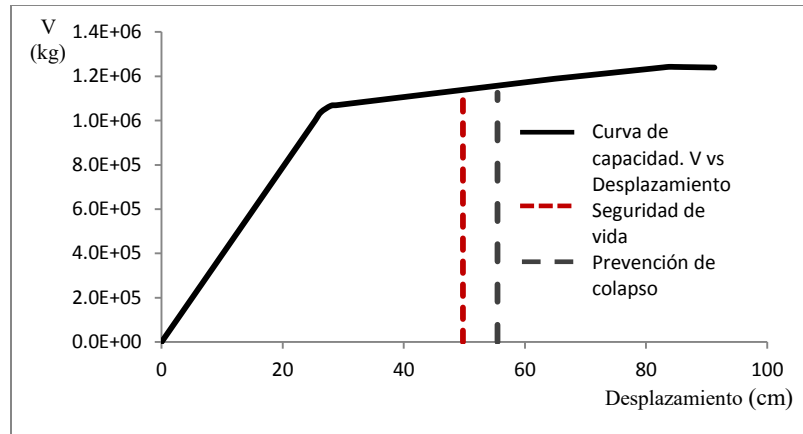


Figura.A.2.27 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M128

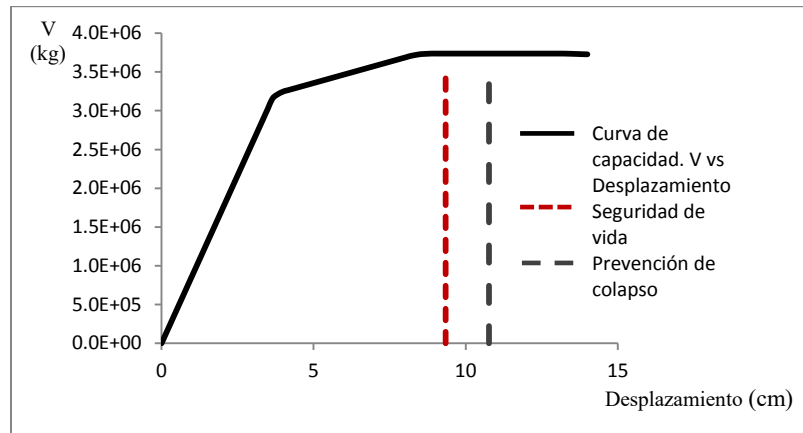


Figura.A.2.28 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M129

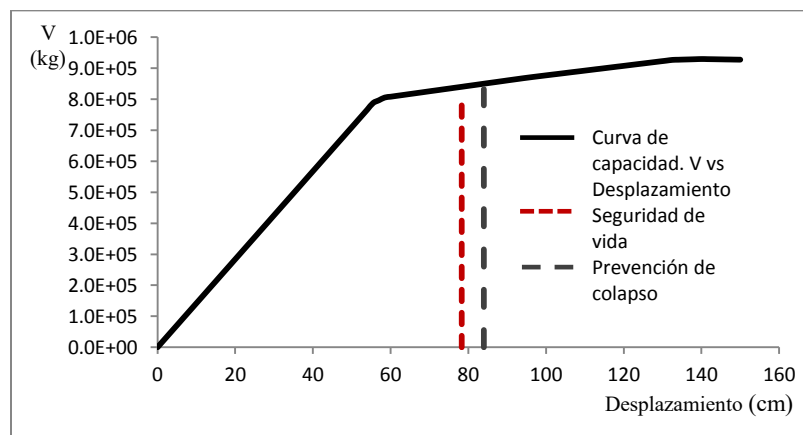


Figura.A.2.29 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M130

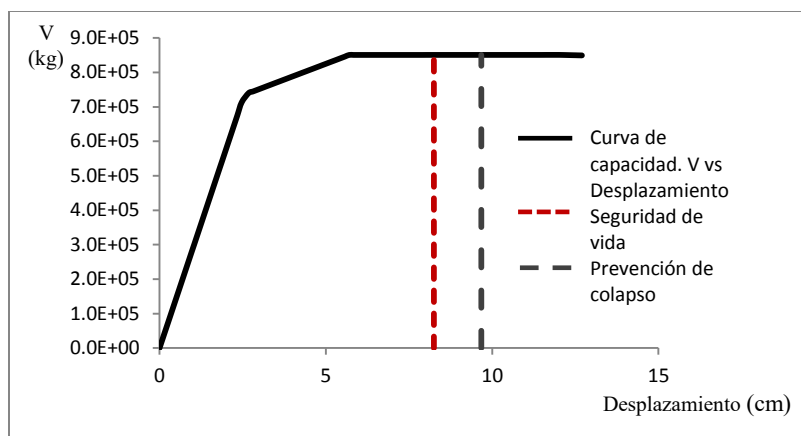


Figura.A.2.30 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M139

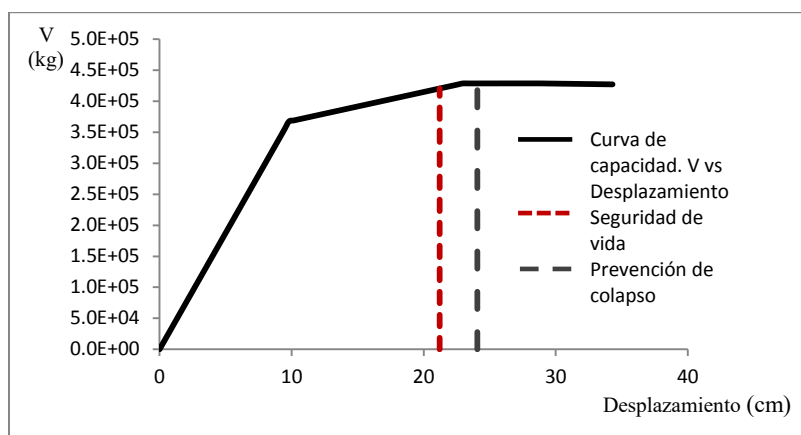


Figura.A.2.31 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M140

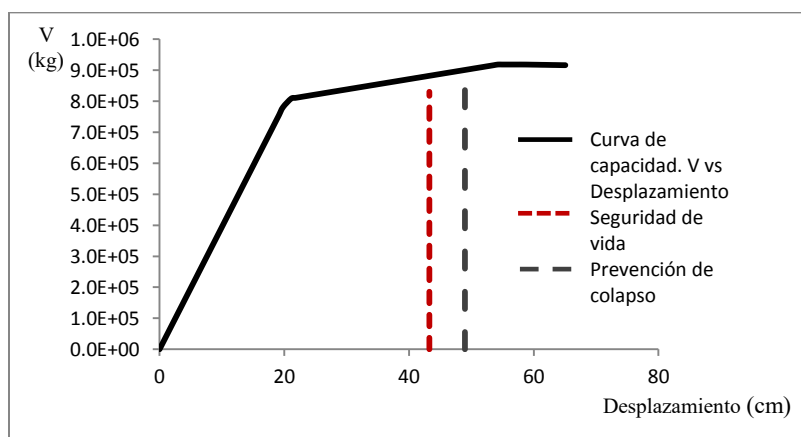


Figura.A.2.32 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M141

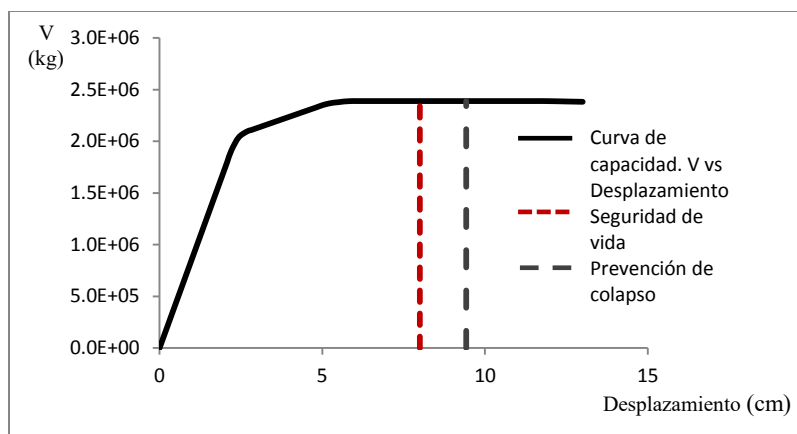


Figura.A.2.33 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M142

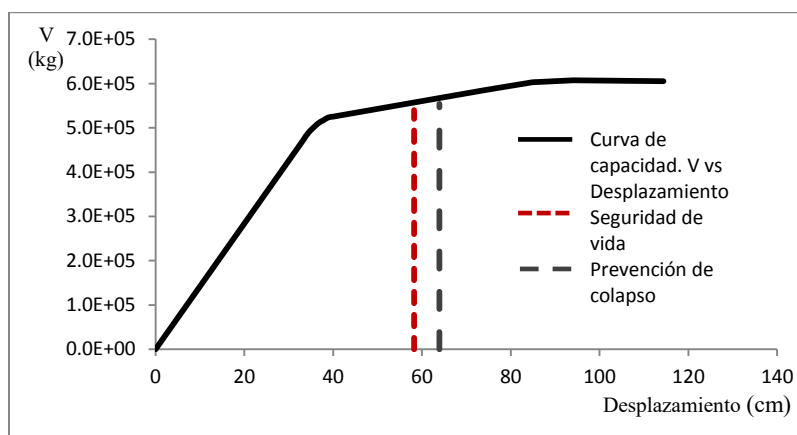


Figura.A.2.34 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M143

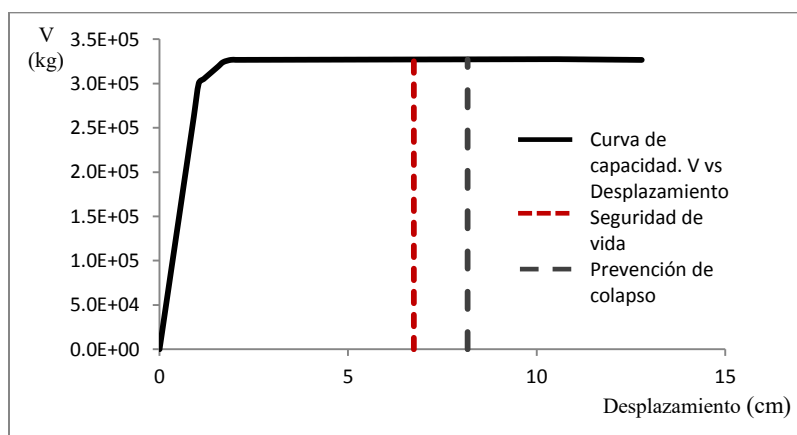


Figura.A.2.35 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M152

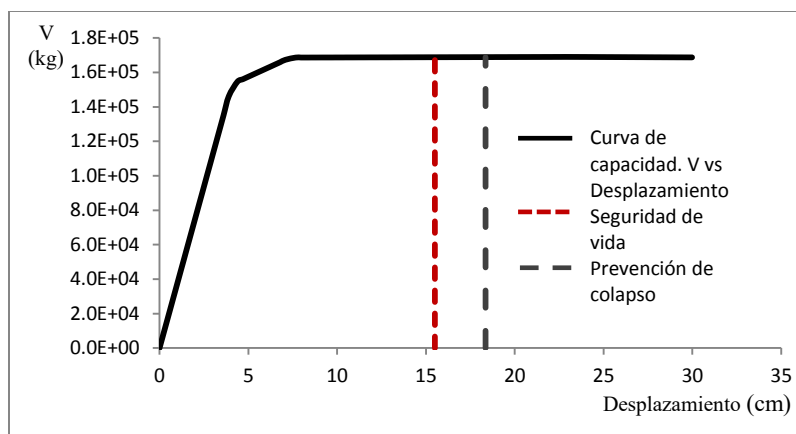


Figura.A.2.36 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M153

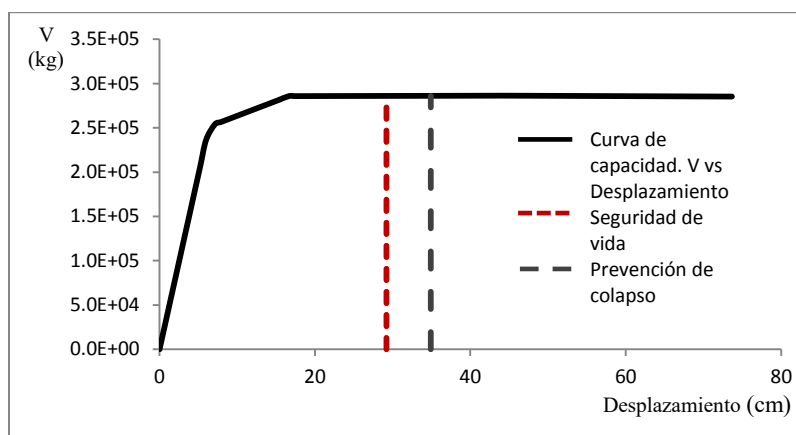


Figura.A.2.37 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M154

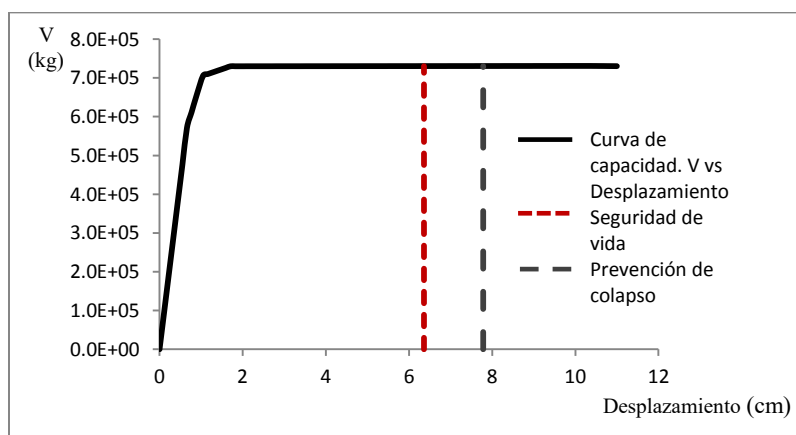


Figura.A.2.38 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M155

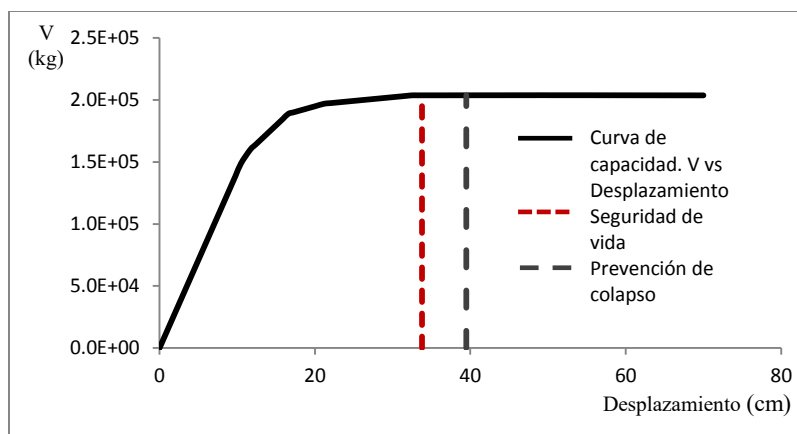


Figura.A.2.39 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M156

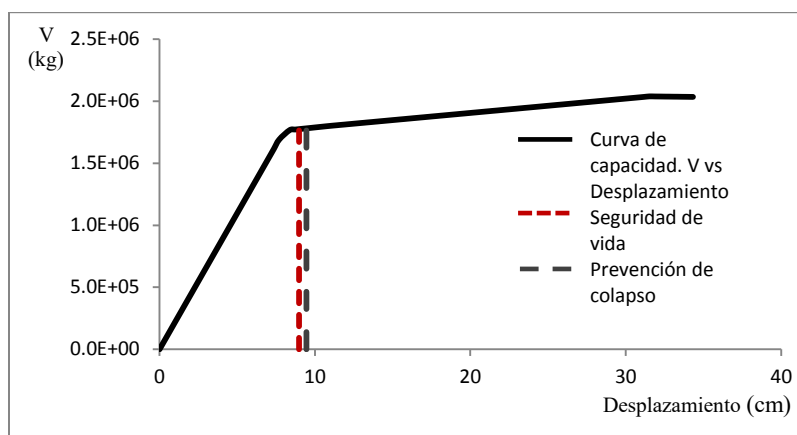


Figura.A.2.40 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M079

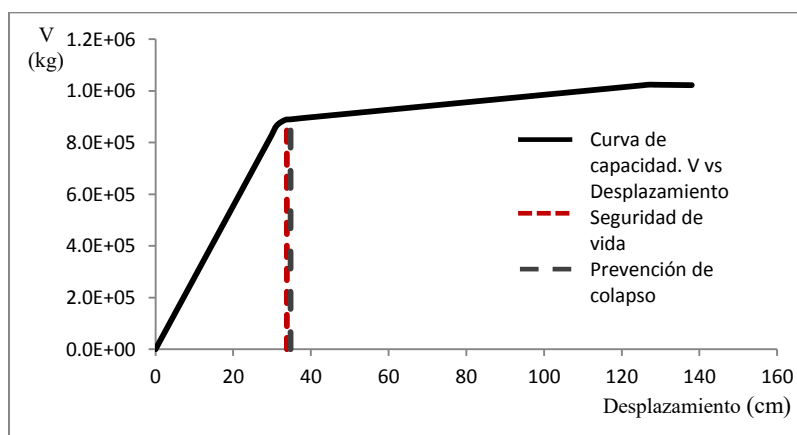


Figura.A.2.41 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M080

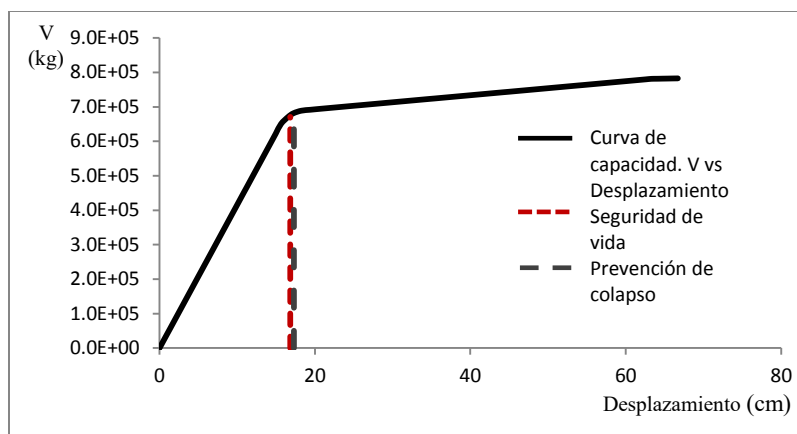


Figura.A.2.42 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M081

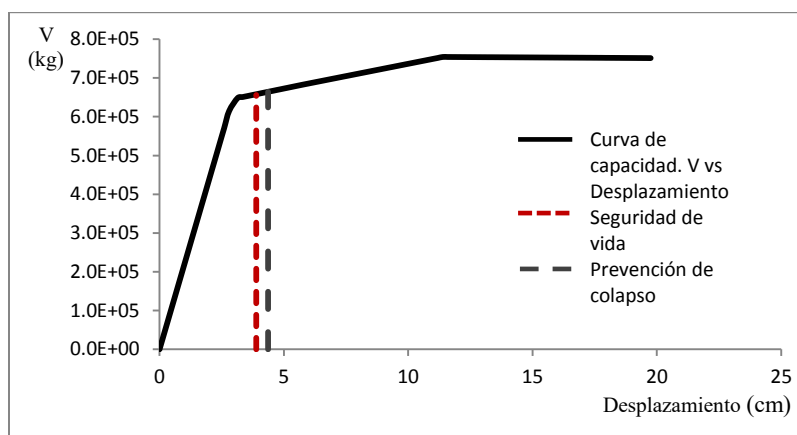


Figura.A.2.43 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M092

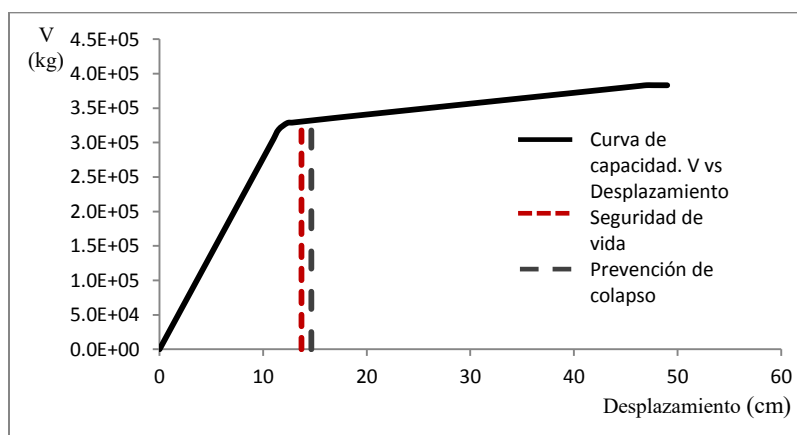


Figura.A.2.44 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M093

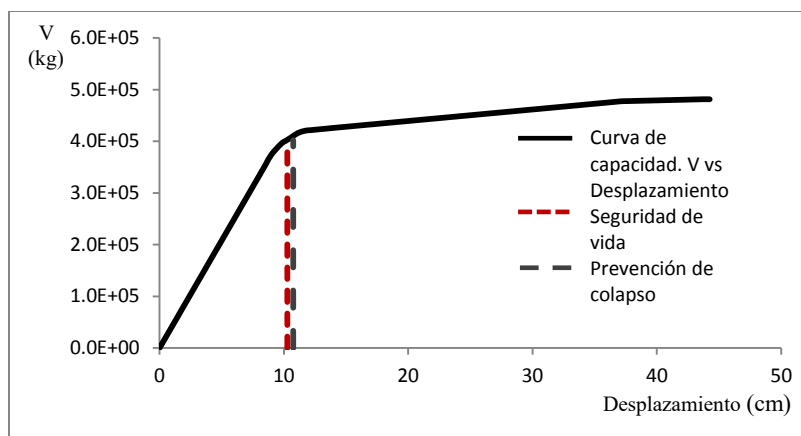


Figura.A.2.45 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M094

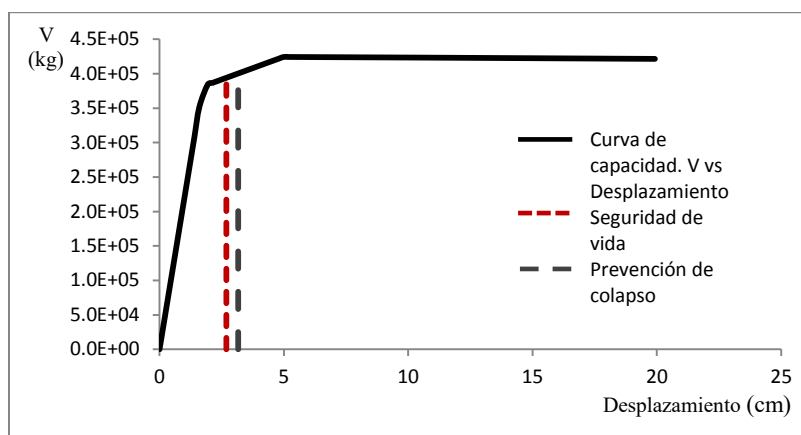


Figura.A.2.46 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M105

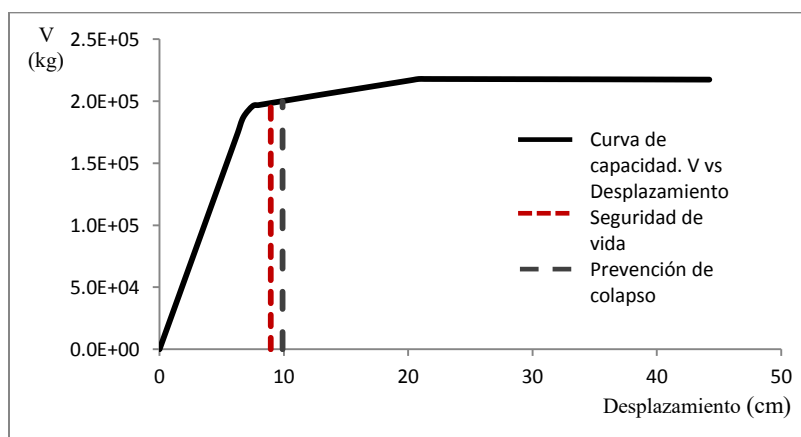


Figura.A.2.47 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M106

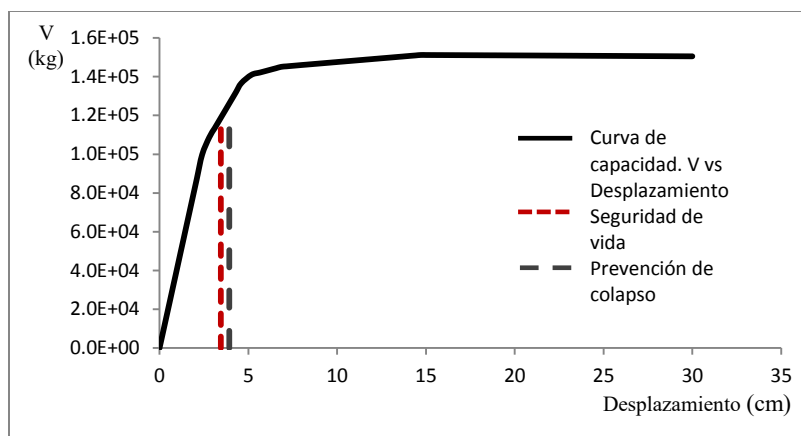


Figura.A.2.48 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M107

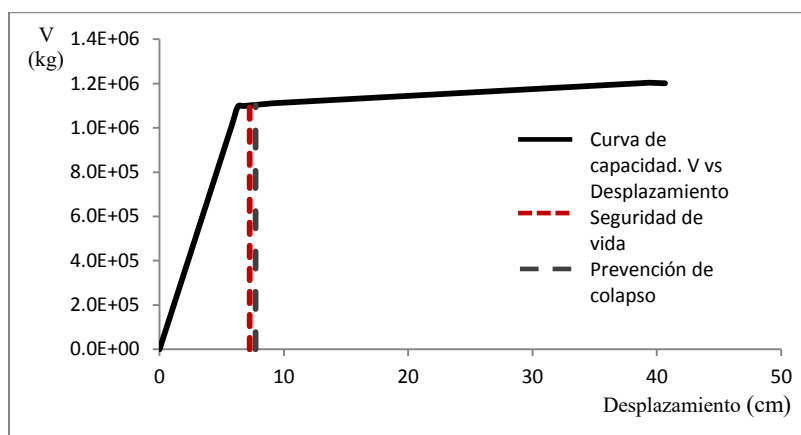


Figura.A.2.49 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M082

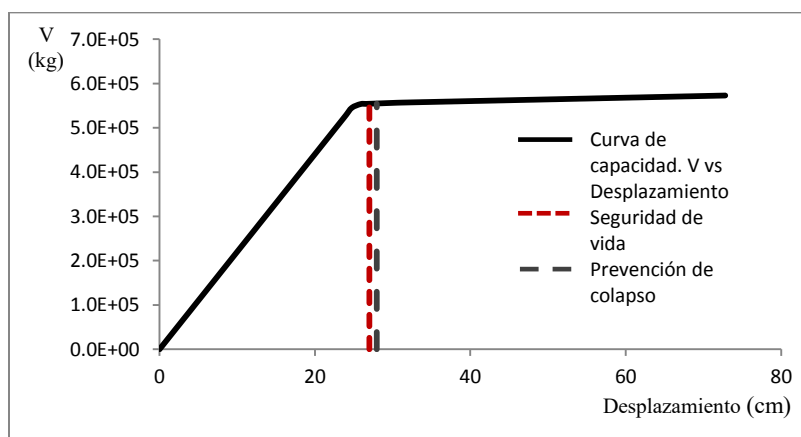


Figura.A.2.50 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M083

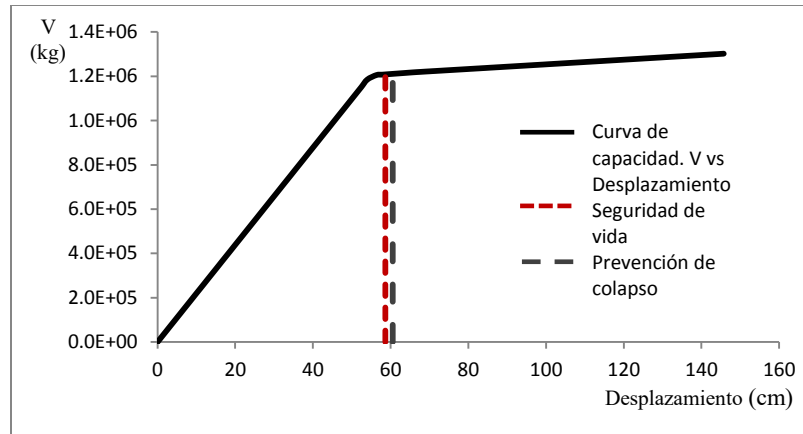


Figura.A.2.51 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M084

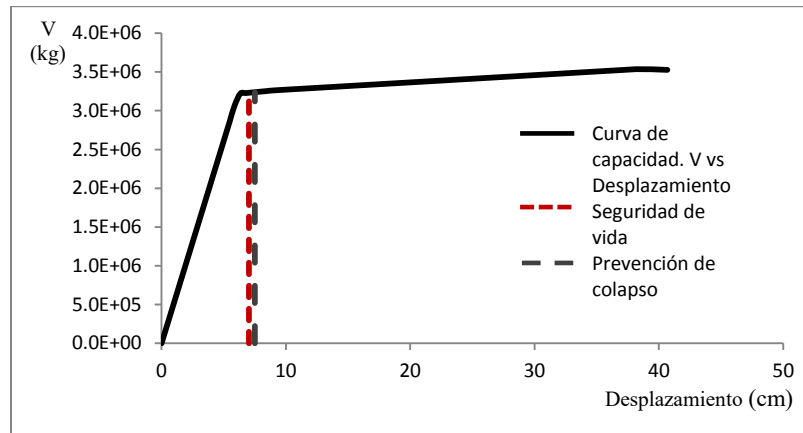


Figura.A.2.52 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M085

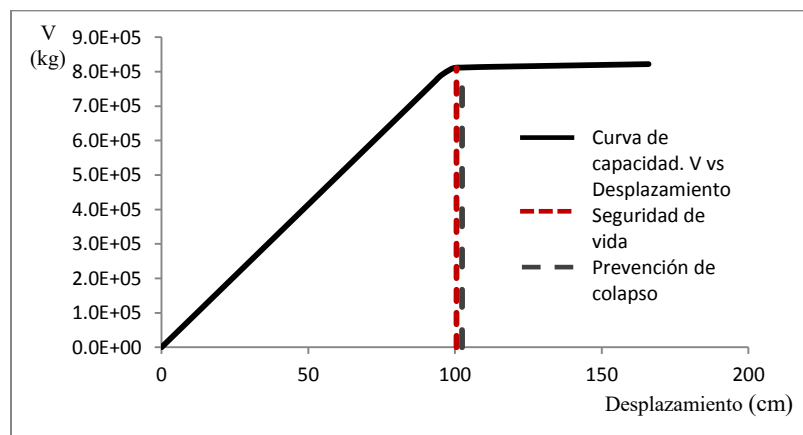


Figura.A.2.53 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M086

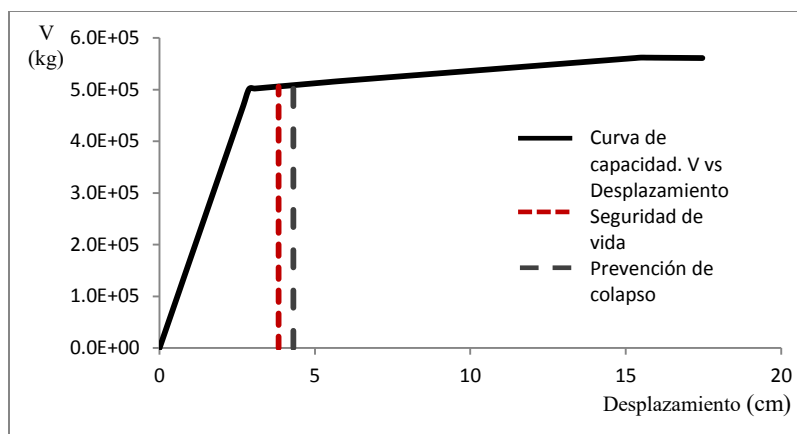


Figura.A.2.54 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M095

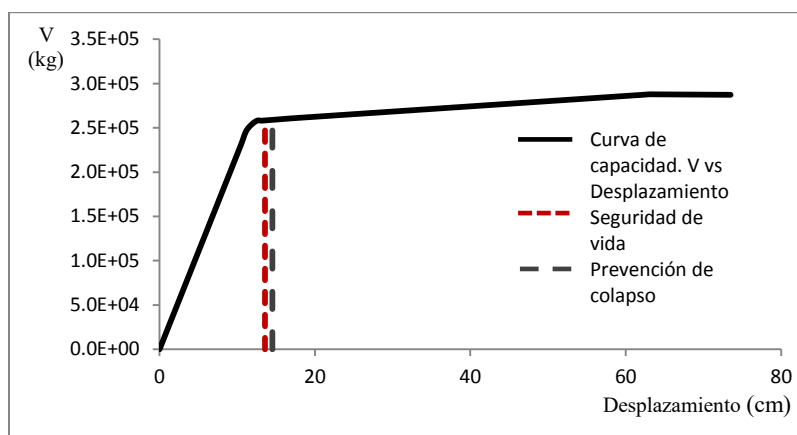


Figura.A.2.55 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M096

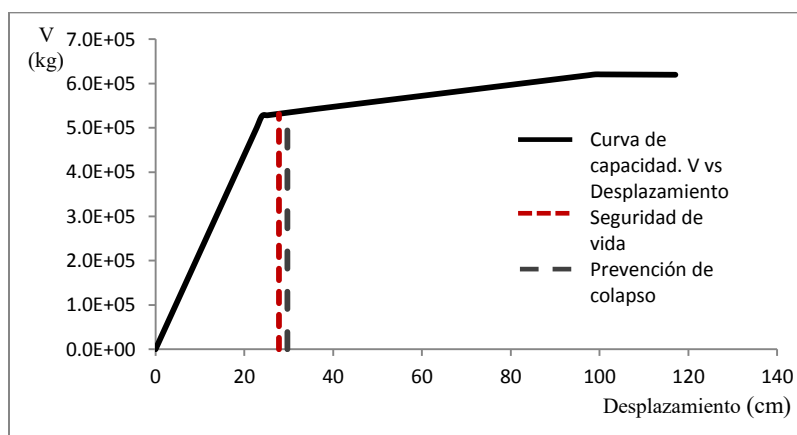


Figura.A.2.56 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M097

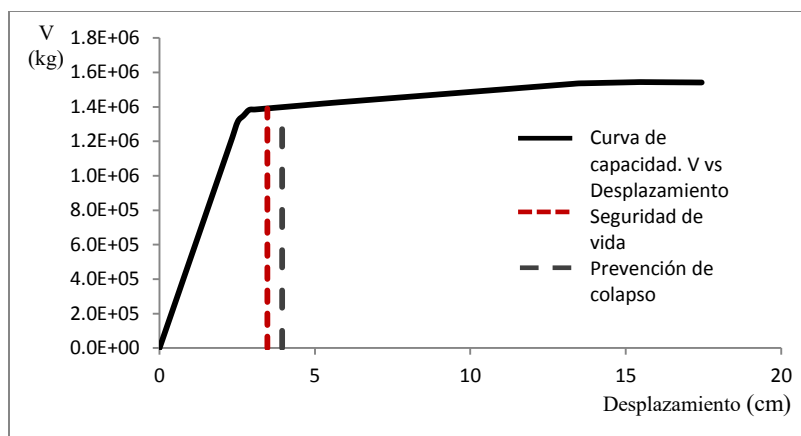


Figura.A.2.57 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M098

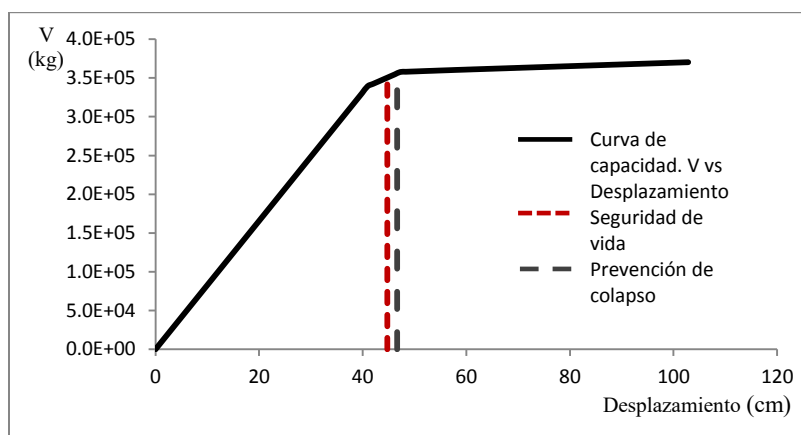


Figura.A.2.58 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M099

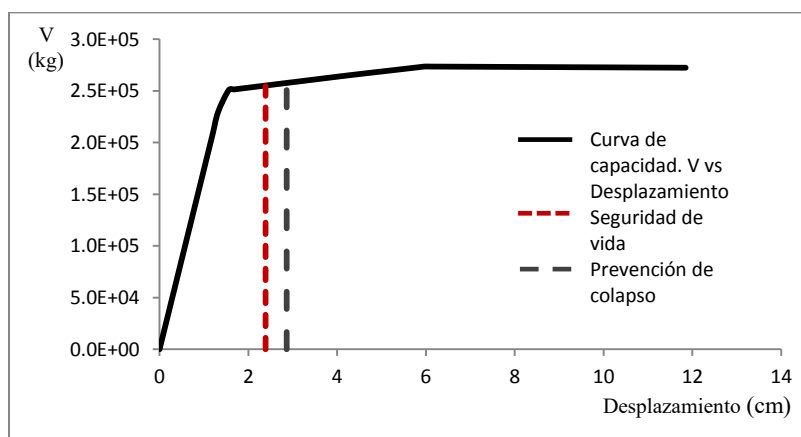


Figura.A.2.59 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M108

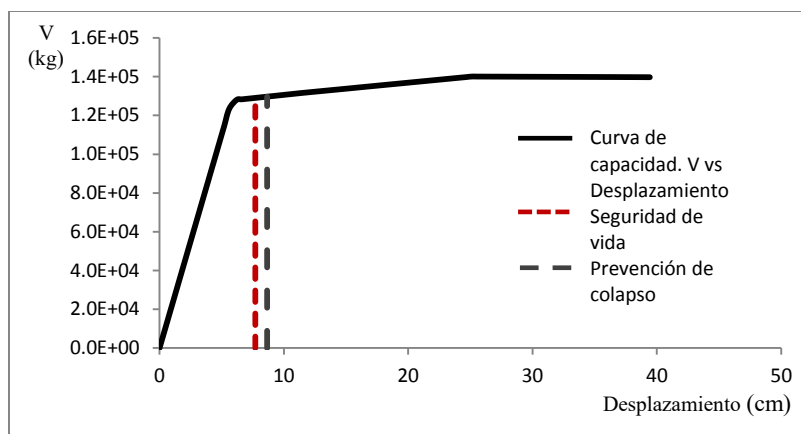


Figura.A.2.60 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M109

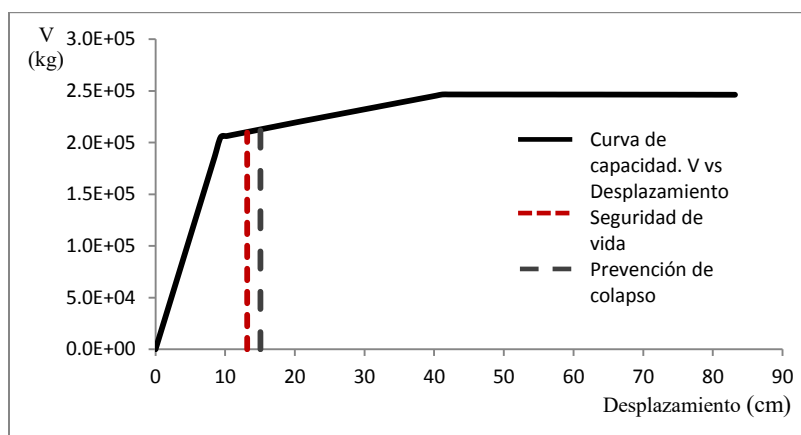


Figura.A.2.61 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M110

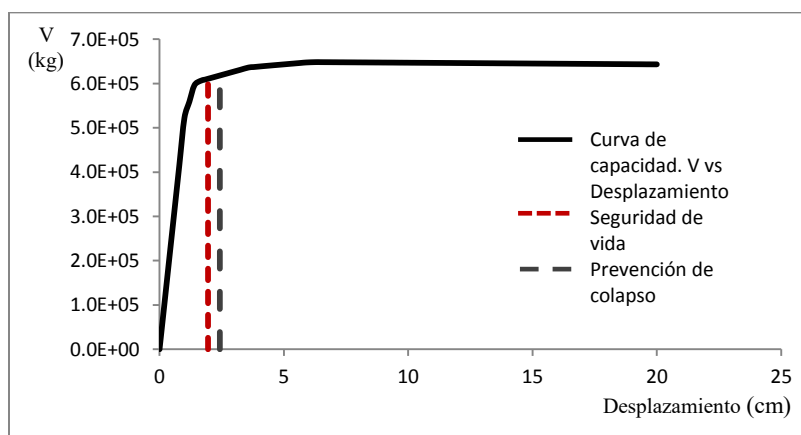


Figura.A.2.62 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M111

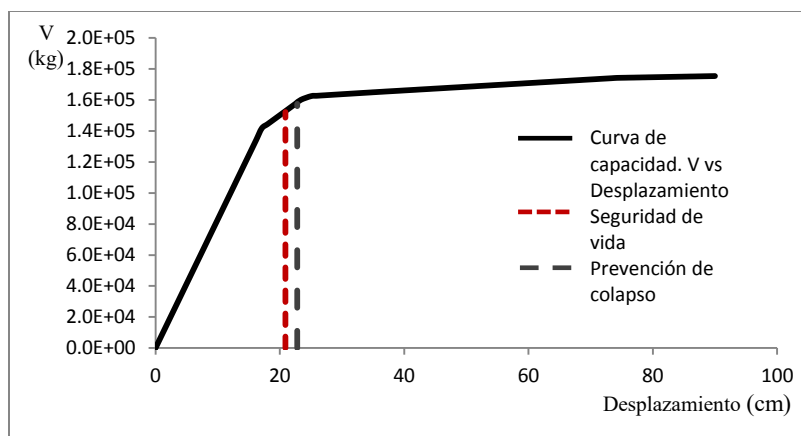


Figura.A.2.63 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M112

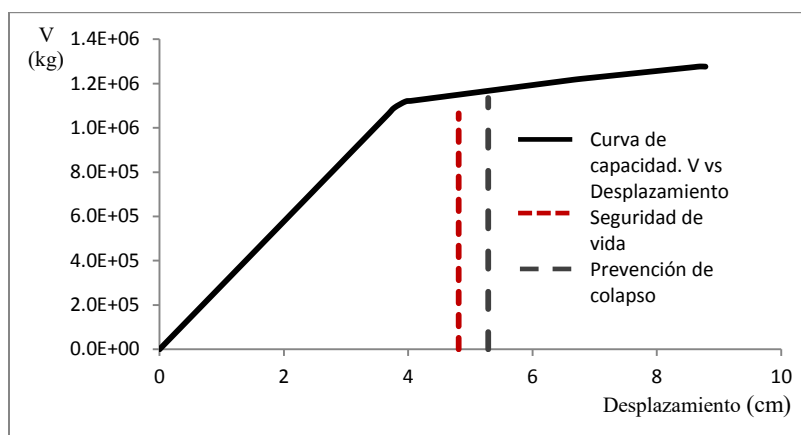


Figura.A.2.64 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M087

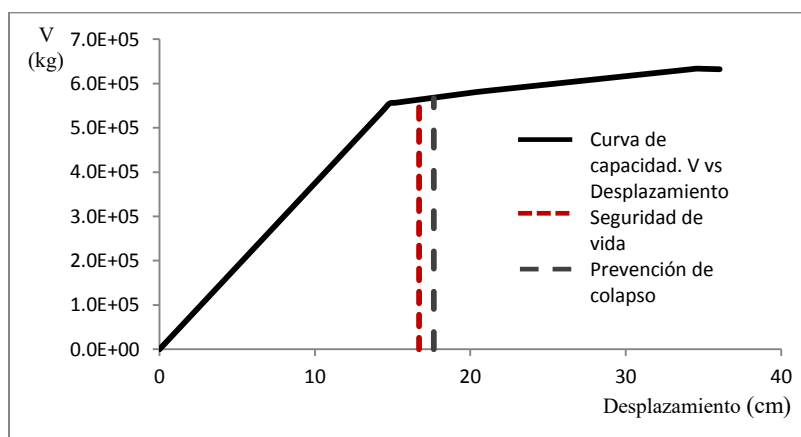


Figura.A.2.65 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M088

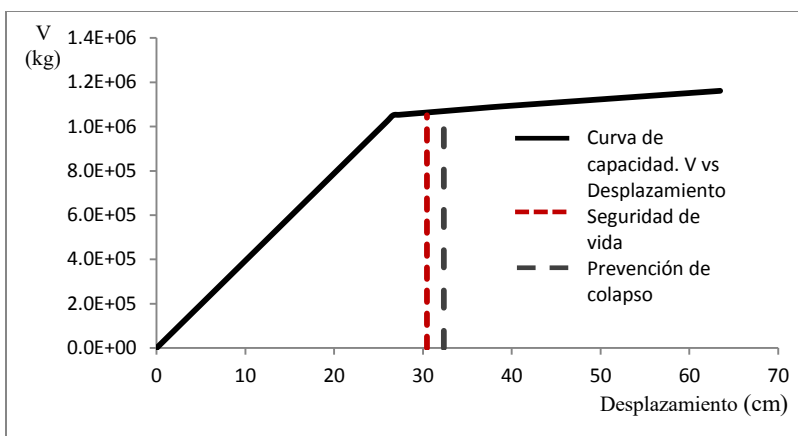


Figura.A.2.66 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M089

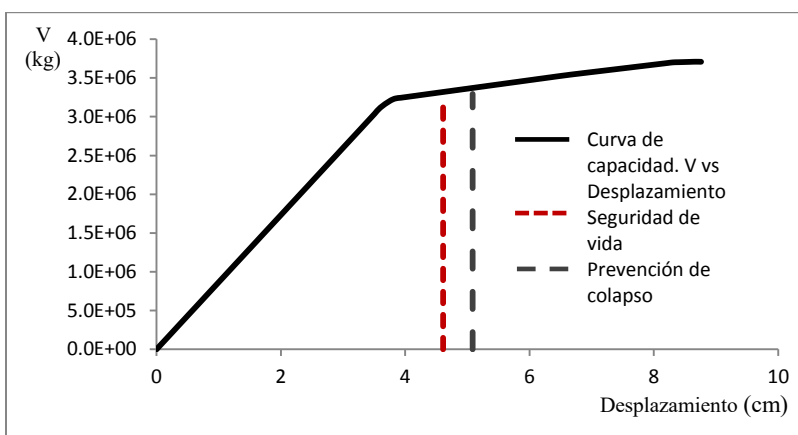


Figura.A.2.67 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M090

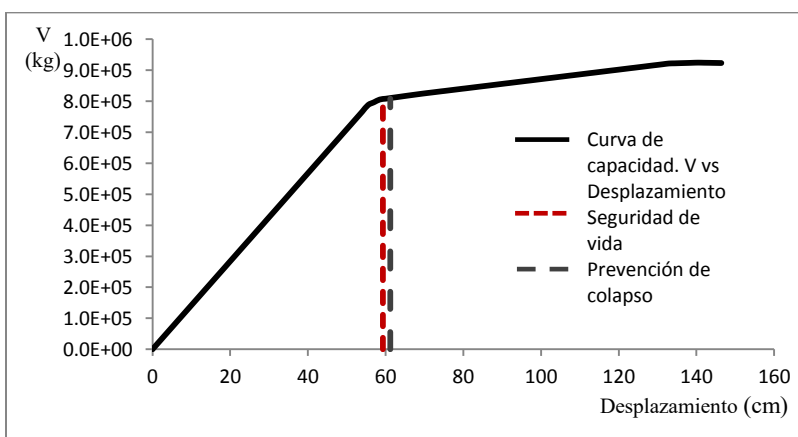


Figura.A.2.68 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M091

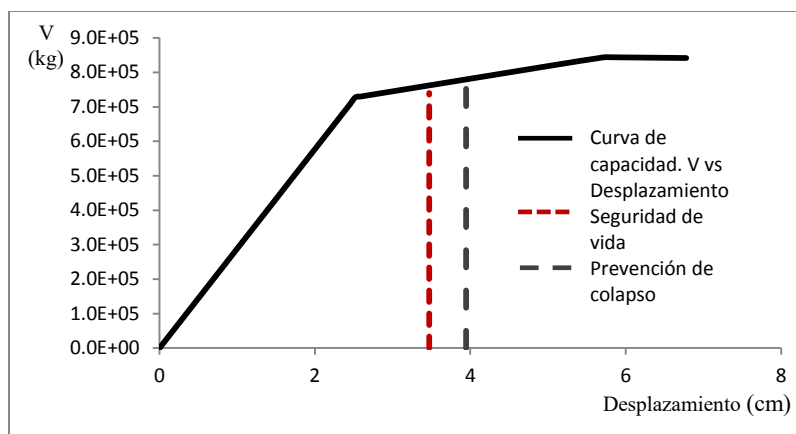


Figura.A.2.69 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M100

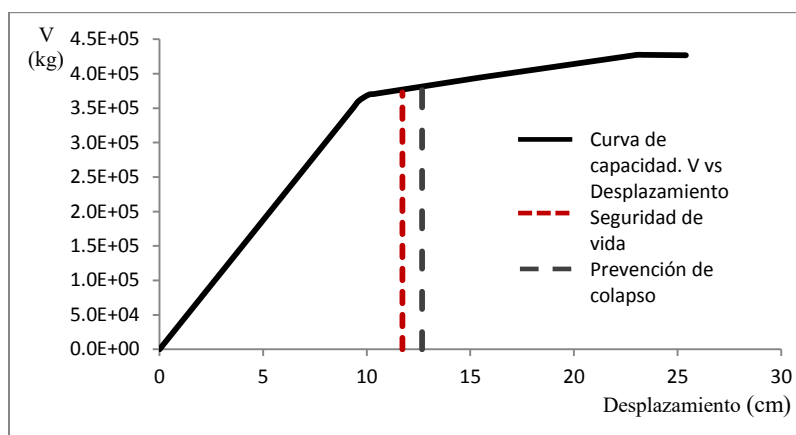


Figura.A.2.70 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M101

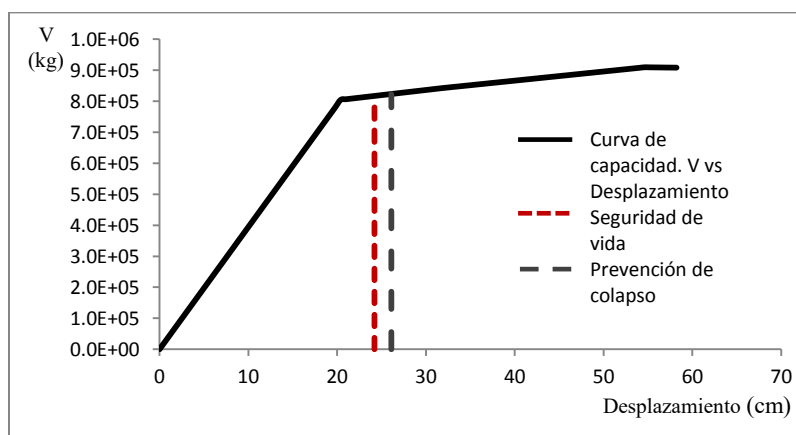


Figura.A.2.71 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M102

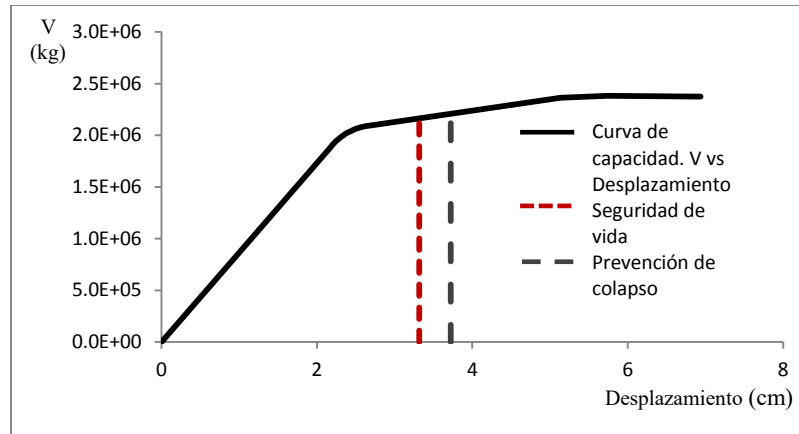


Figura.A.2.72 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M103

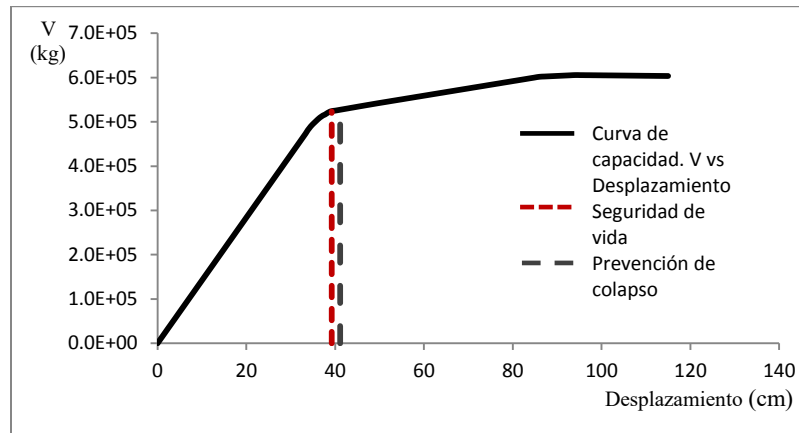


Figura.A.2.73 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M104

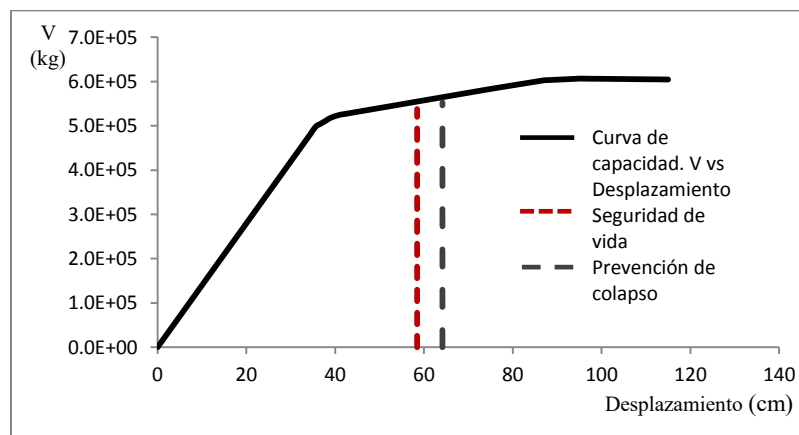


Figura.A.2.74 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M208

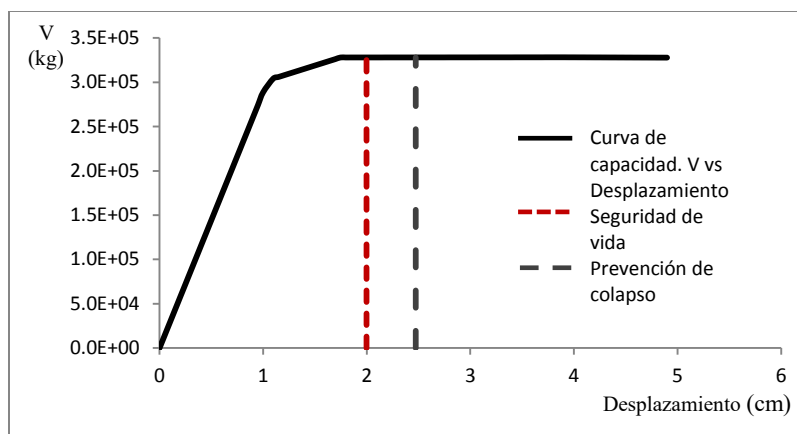


Figura.A.2.75 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M113

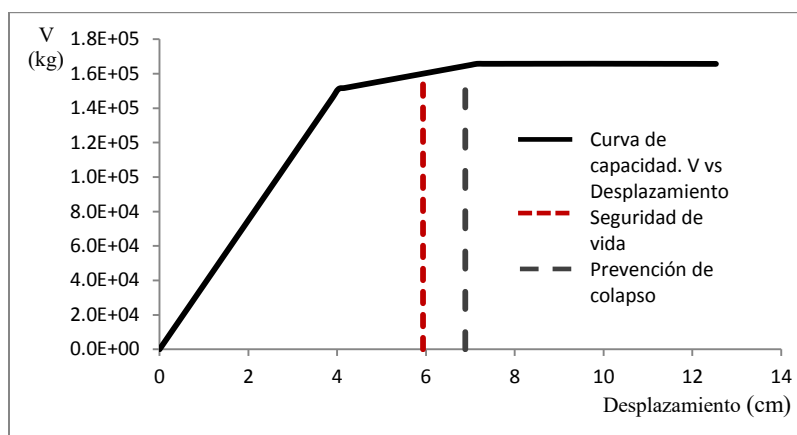


Figura.A.2.76 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M114

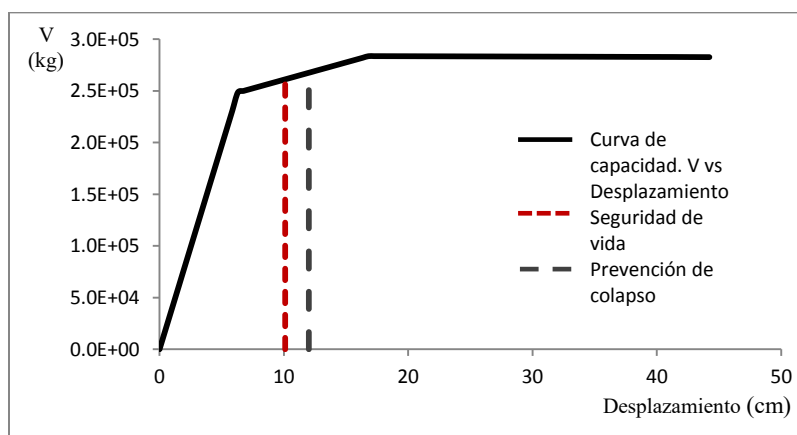


Figura.A.2.77 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M115

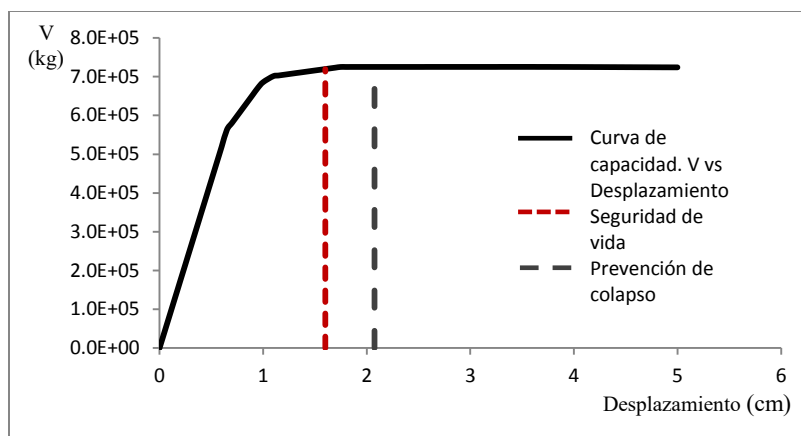


Figura.A.2.78 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M116

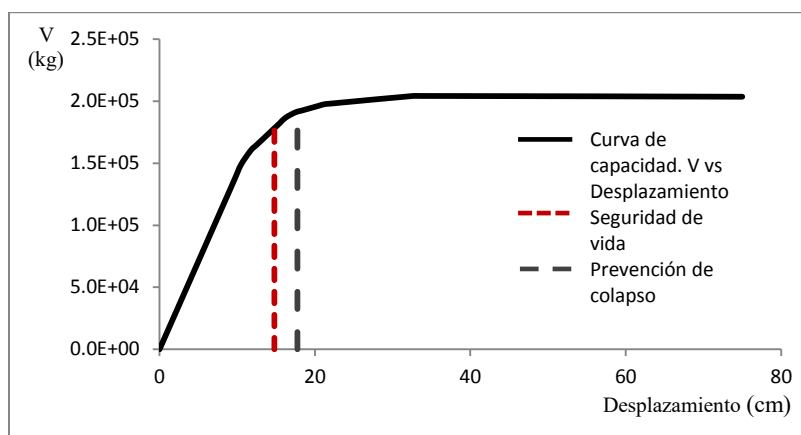


Figura.A.2.79 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M117

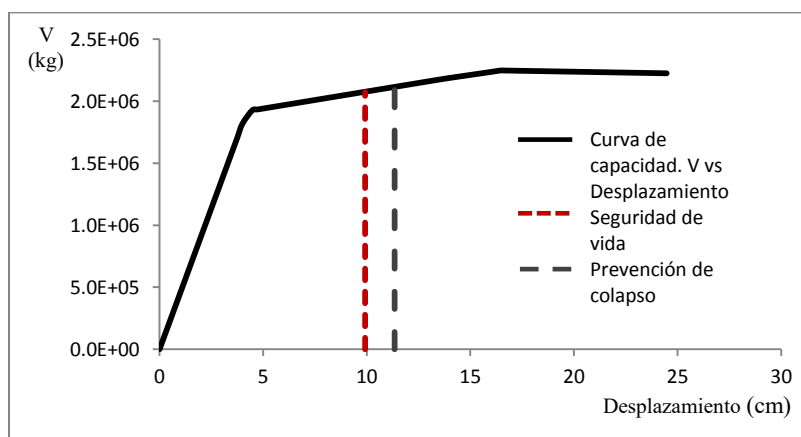


Figura.A.2.80 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M040

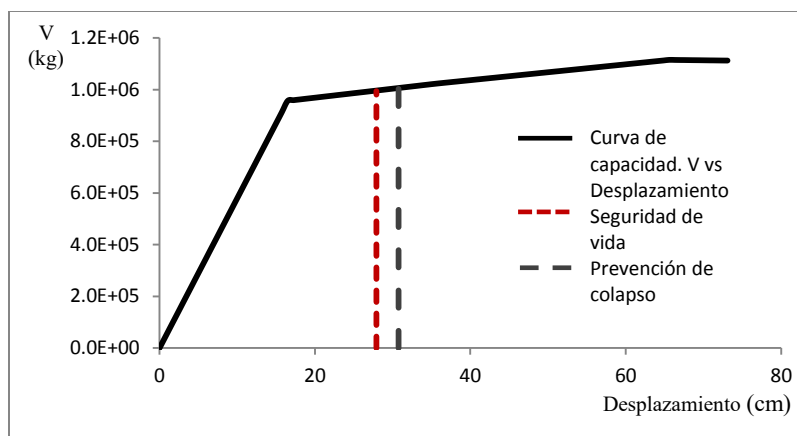


Figura.A.2.81 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M041

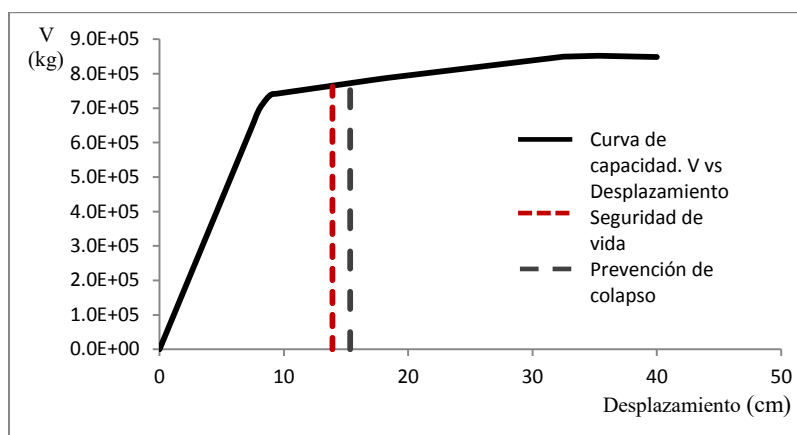


Figura.A.2.82 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M042

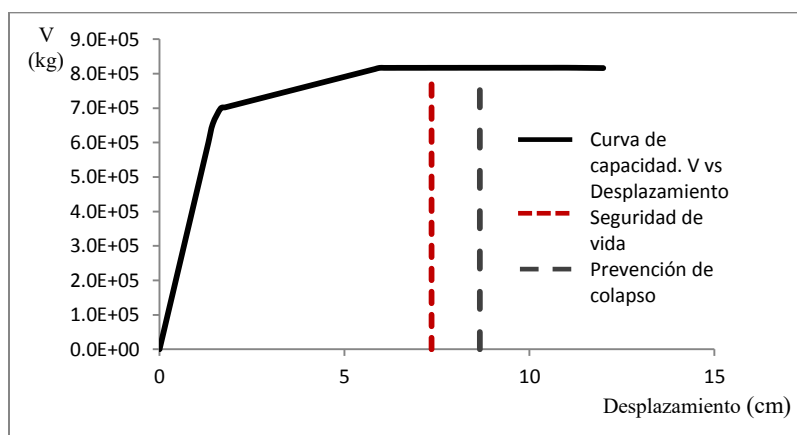


Figura.A.2.83 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M053

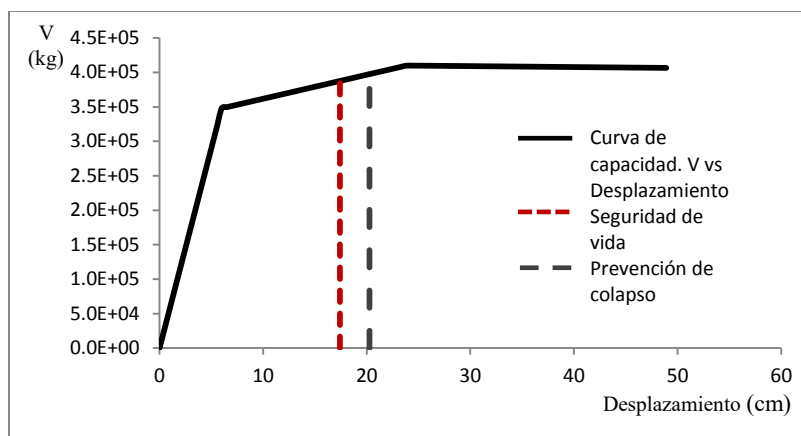


Figura.A.2.84 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M054

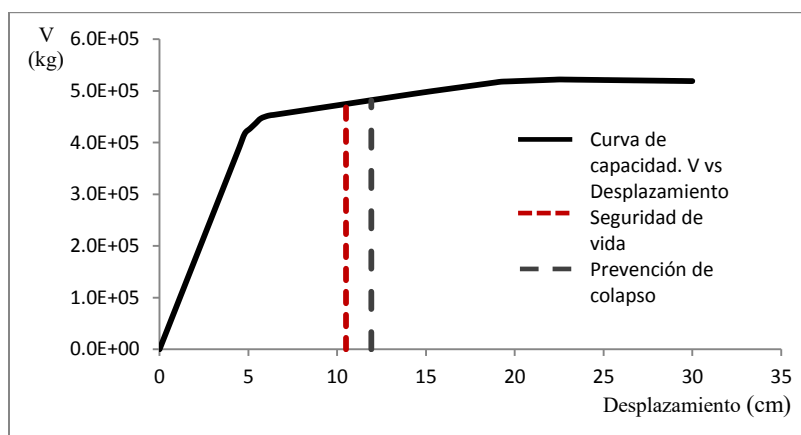


Figura.A.2.85 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M055

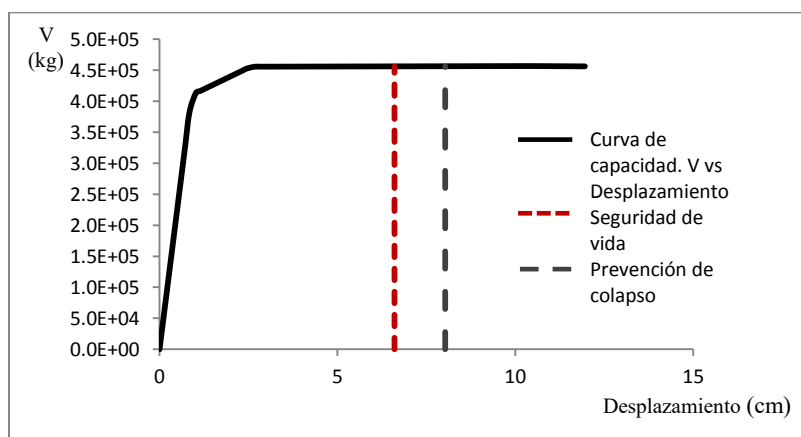


Figura.A.2.86 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M066

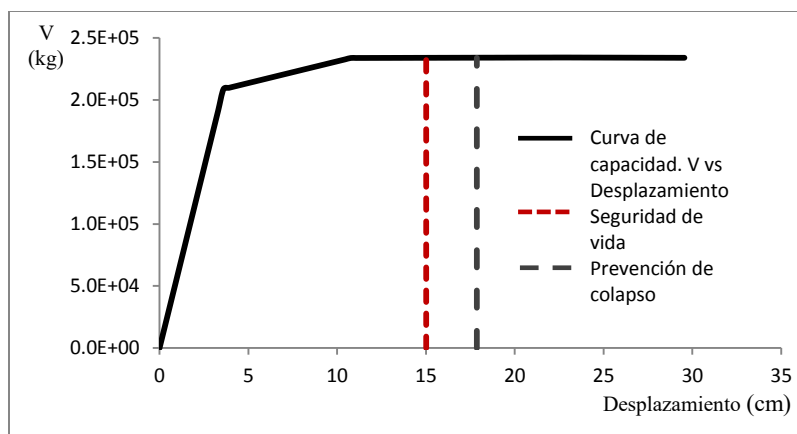


Figura.A.2.87 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M067

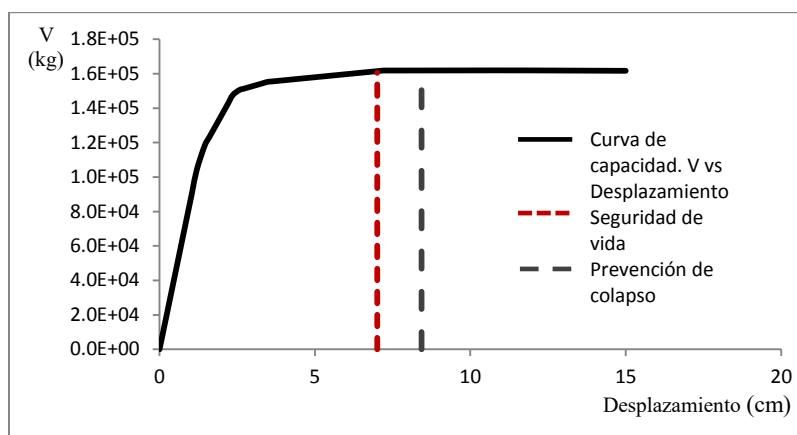


Figura.A.2.88 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M068

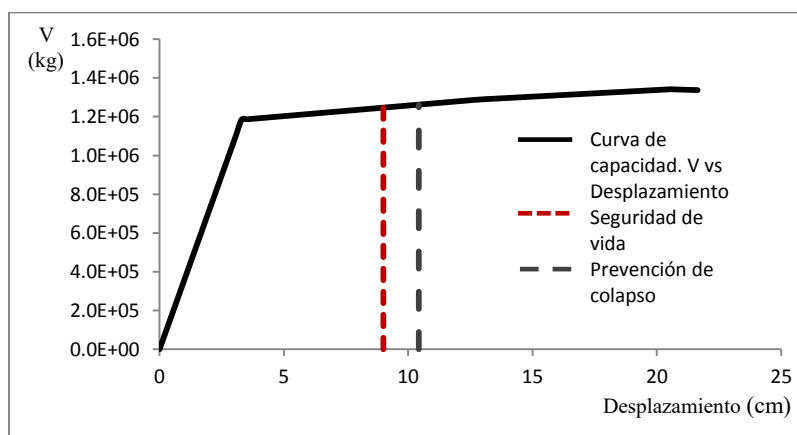


Figura.A.2.89 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M043

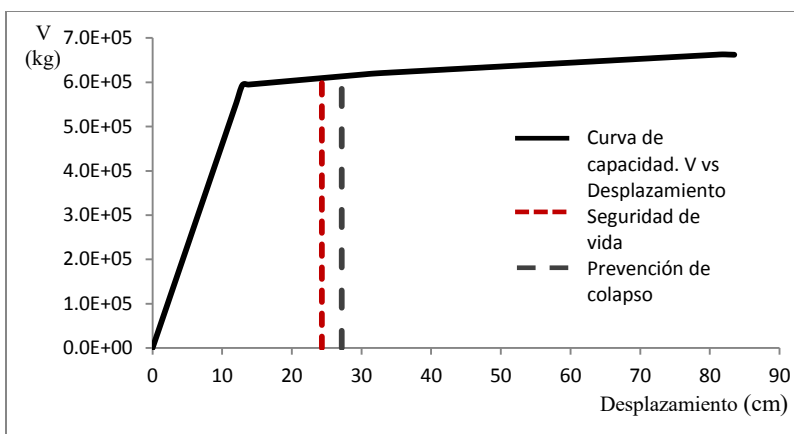


Figura.A.2.90 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M044

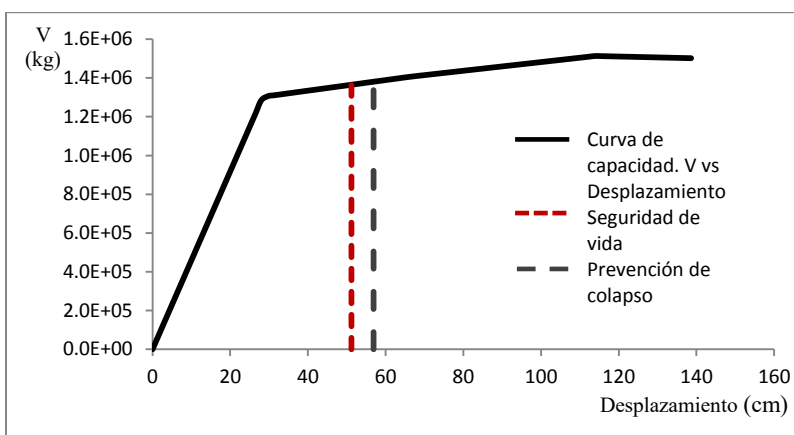


Figura.A.2.91 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M045

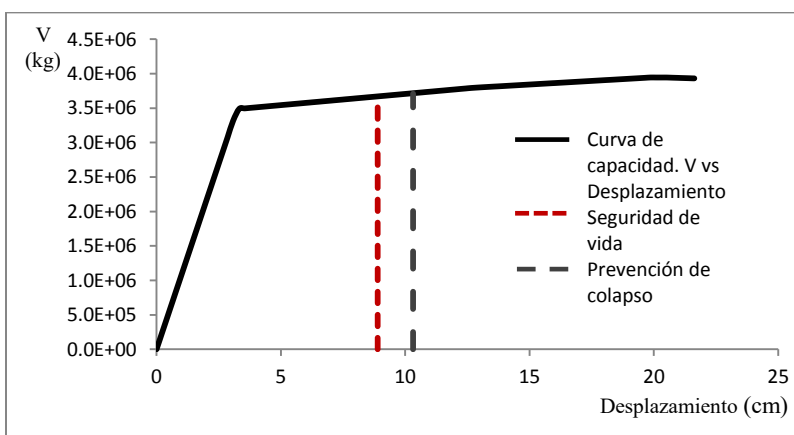


Figura.A.2.92 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M046

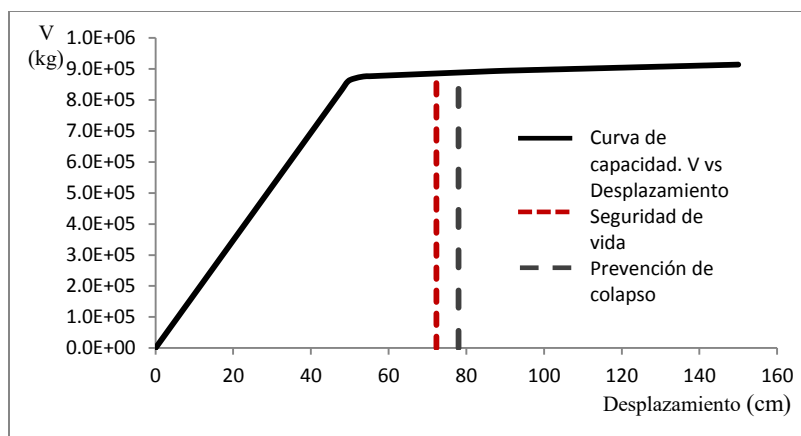


Figura.A.2.93 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M047

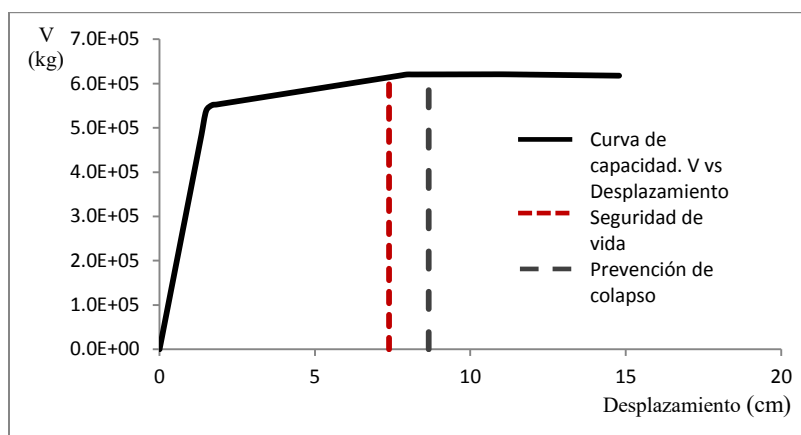


Figura.A.2.94 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056

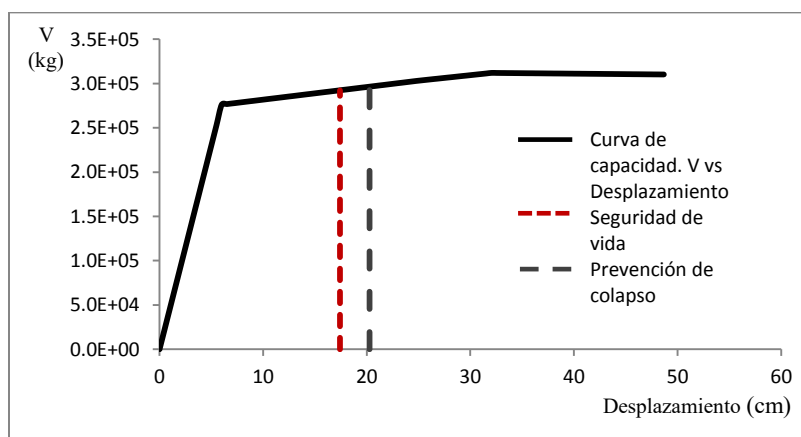


Figura.A.2.95 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M057

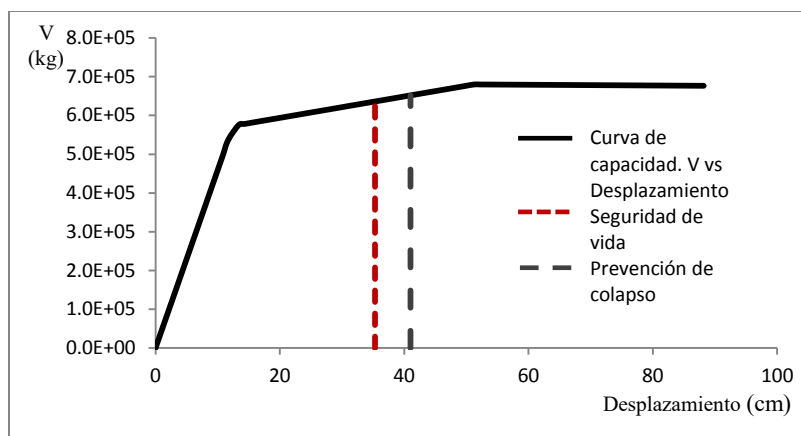


Figura.A.2.96 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M058

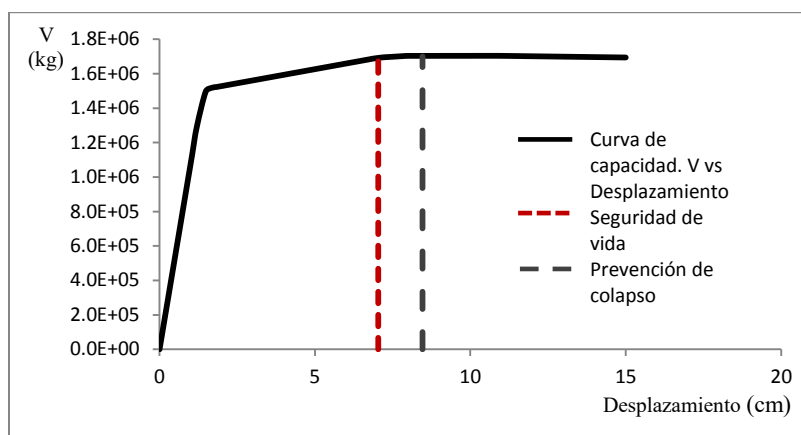


Figura.A.2.97 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M059

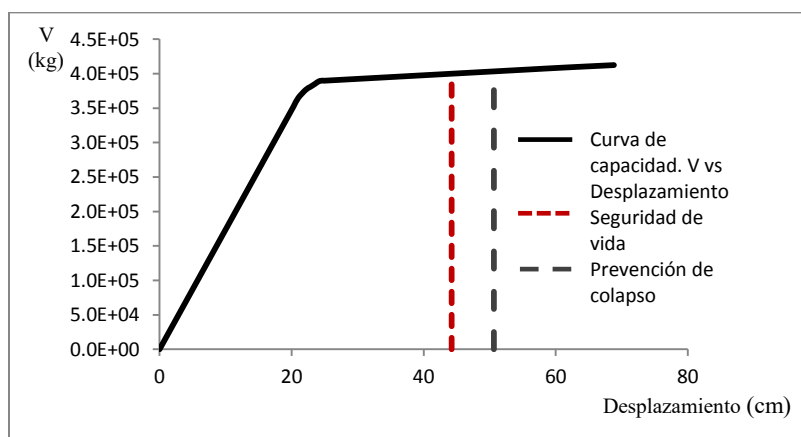


Figura.A.2.98 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M060

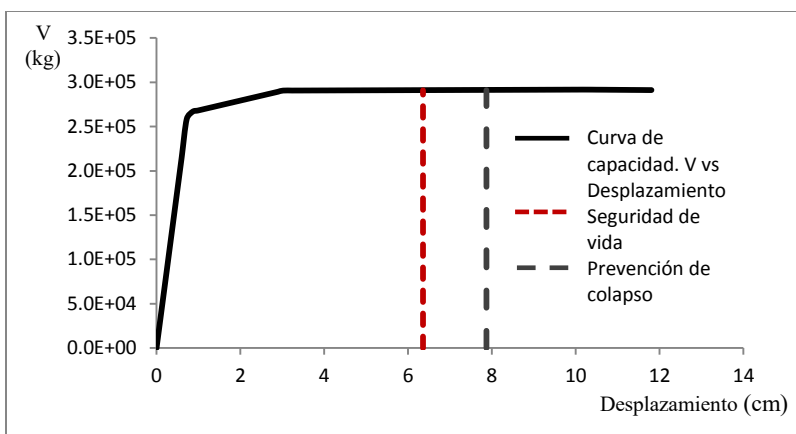


Figura.A.2.99 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M069

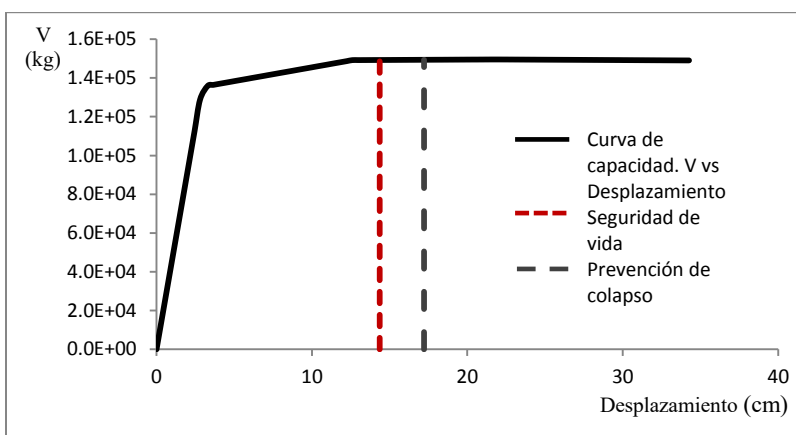


Figura.A.2.100 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M070

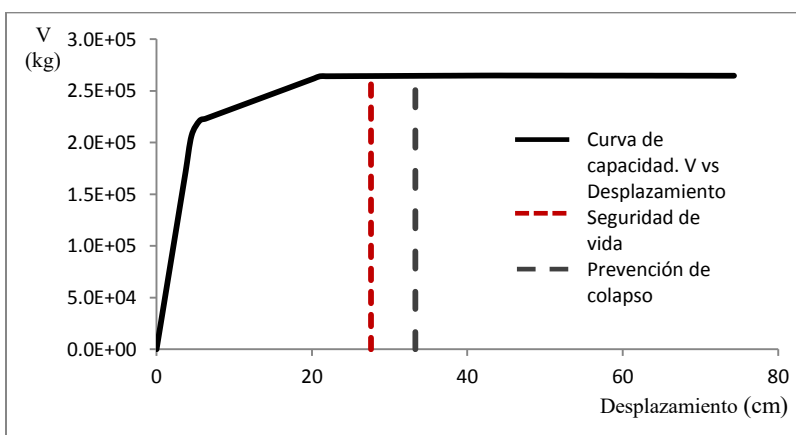


Figura.A.2.101 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M071

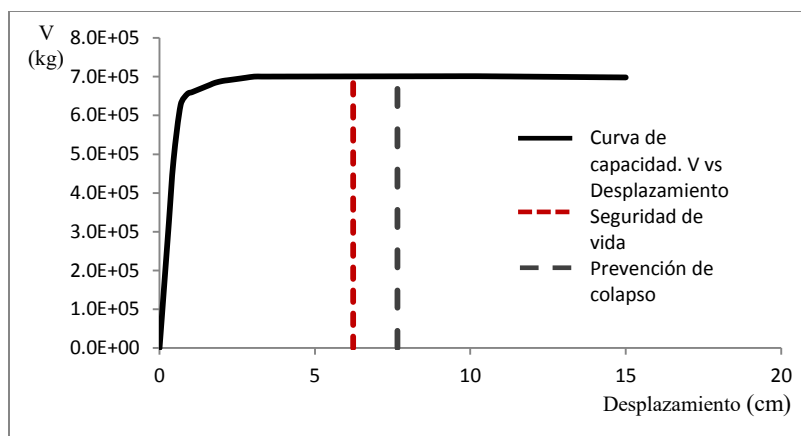


Figura.A.2.102 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M072

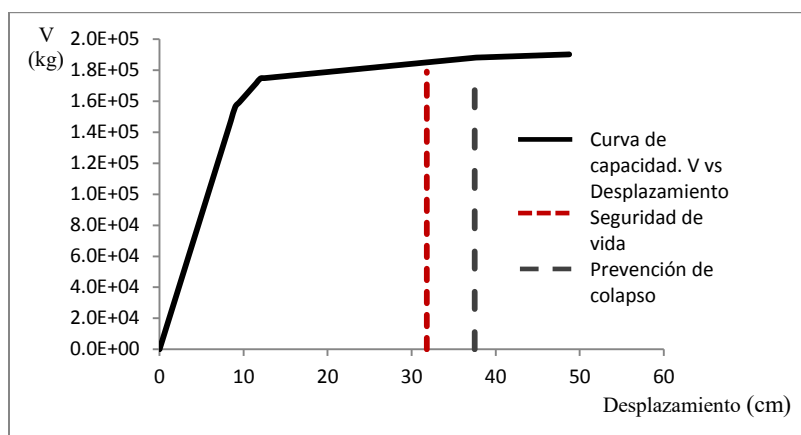


Figura.A.2.103 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M073

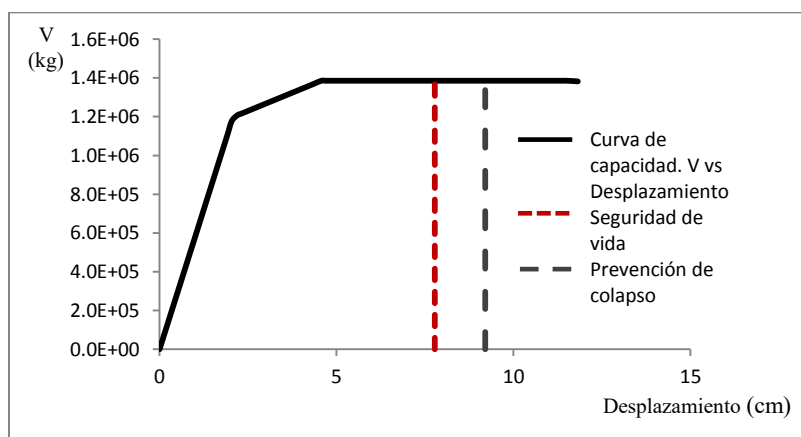


Figura.A.2.104 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M048

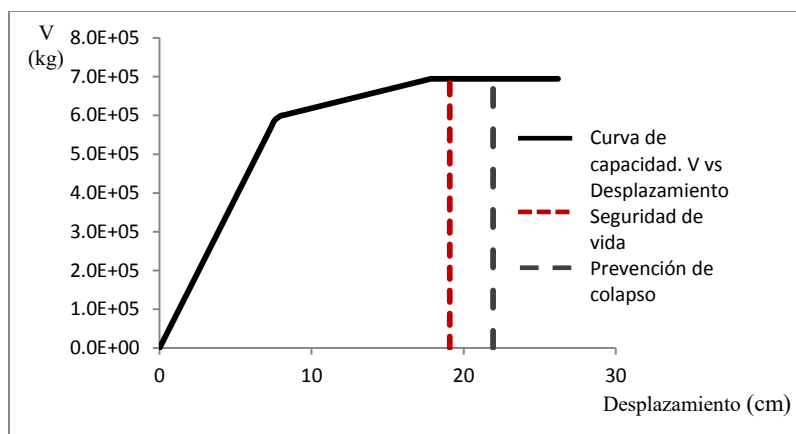


Figura.A.2.105 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M049

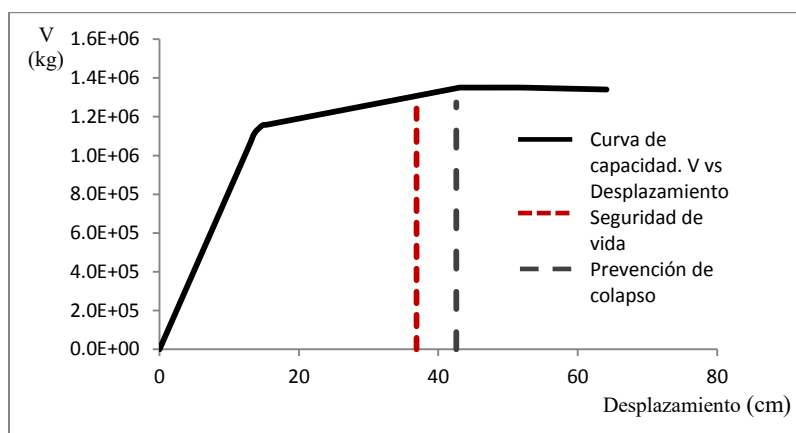


Figura.A.2.106 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M050

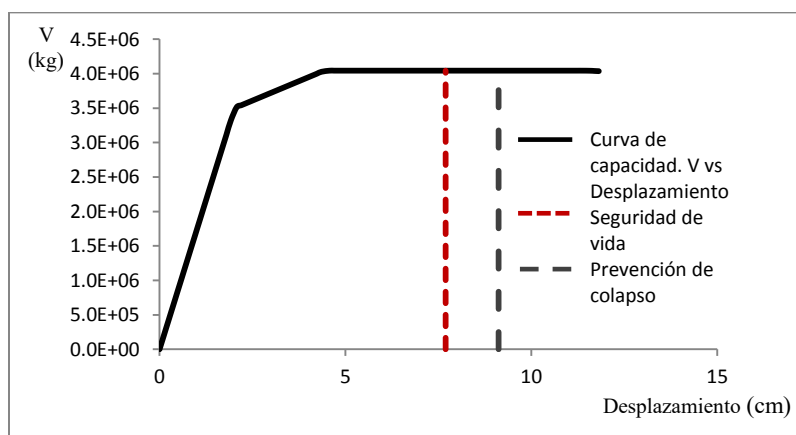


Figura.A.2.107 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M051

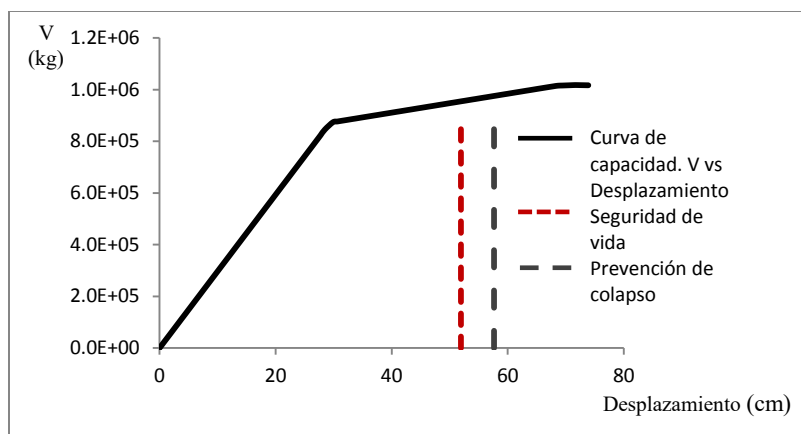


Figura.A.2.108 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M052

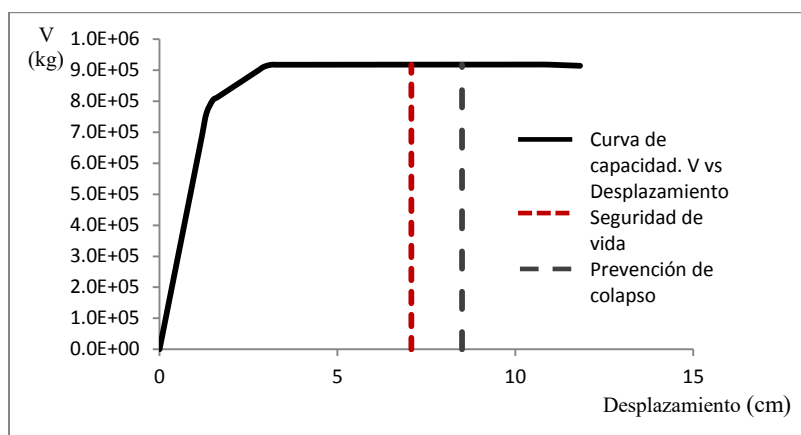


Figura.A.2.109 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M061

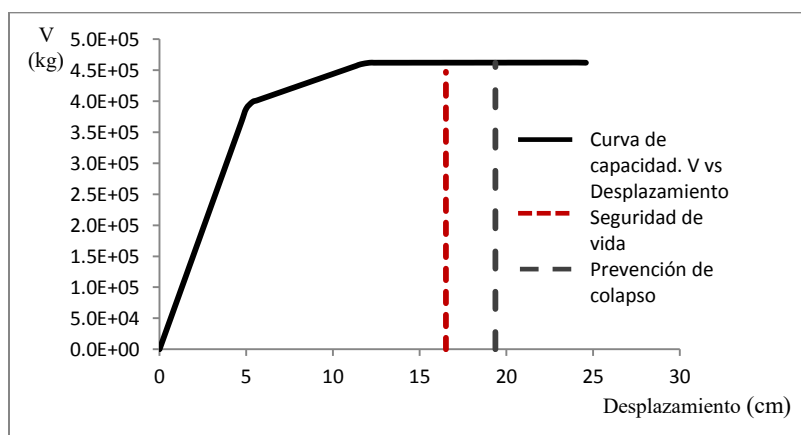


Figura.A.2.110 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M062

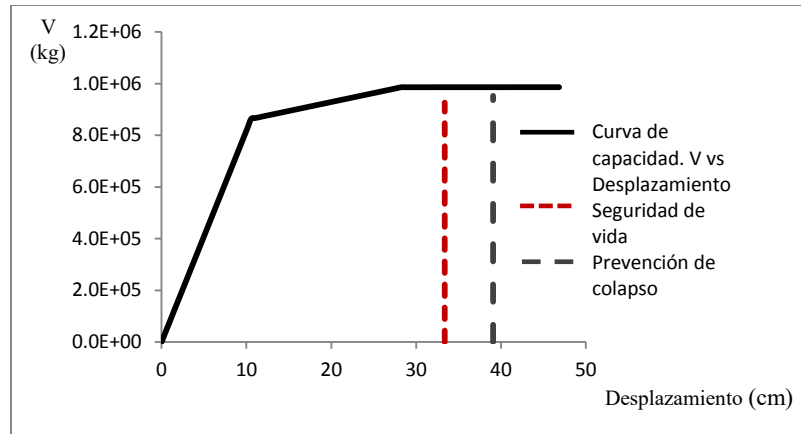


Figura.A.2.111 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M063

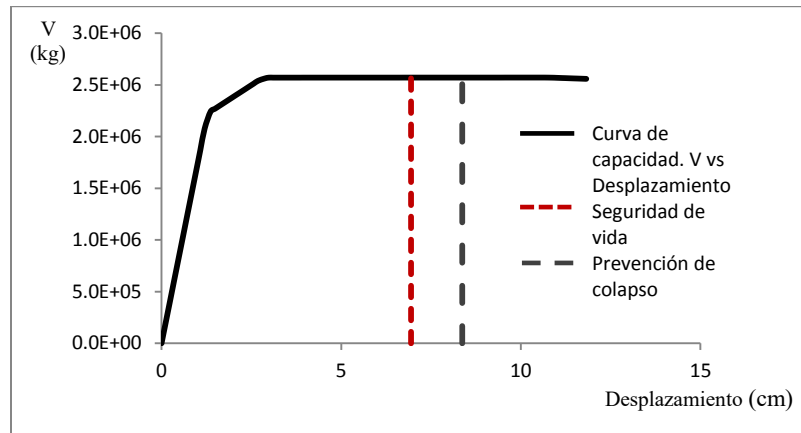


Figura.A.2.112 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M064

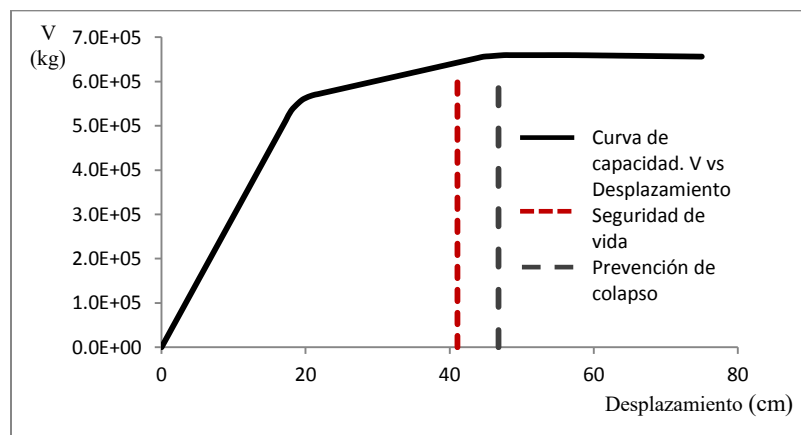


Figura.A.2.113 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M065

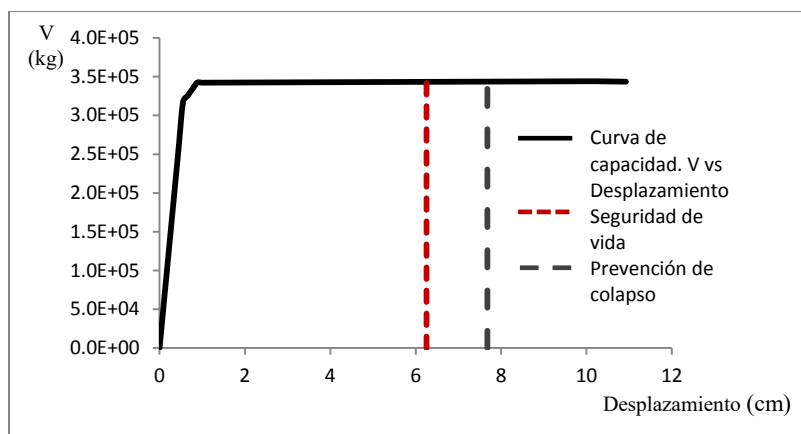


Figura.A.2.114 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M074

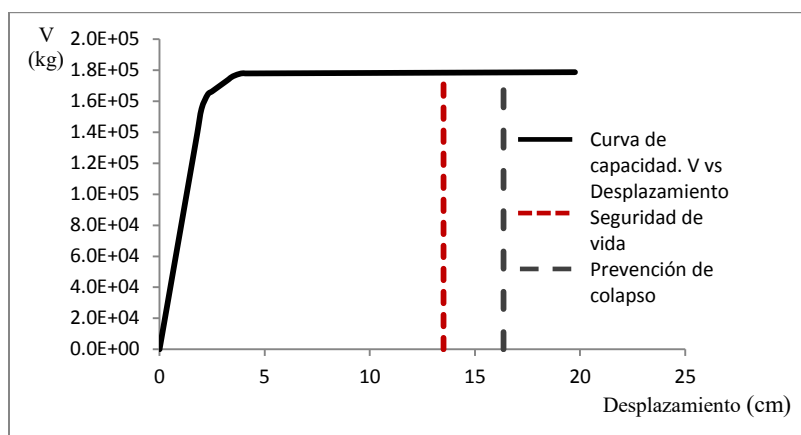


Figura.A.2.115 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M075

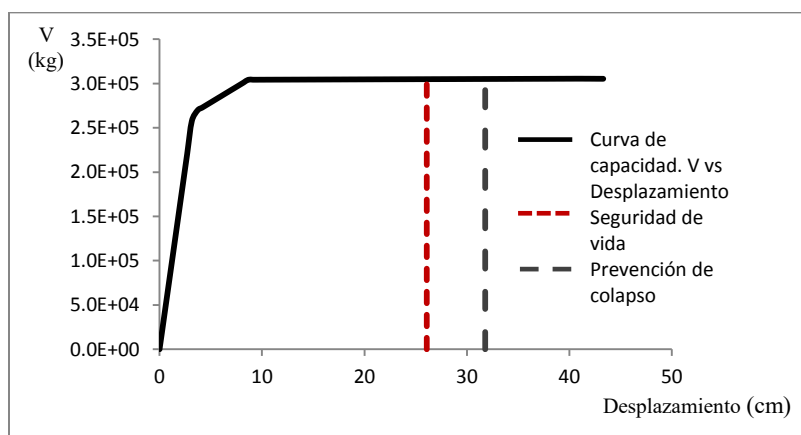


Figura.A.2.116 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M076

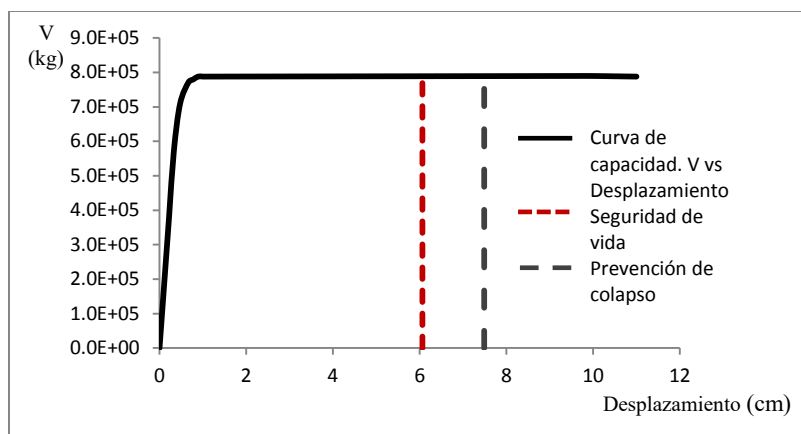


Figura.A.2.117 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M077

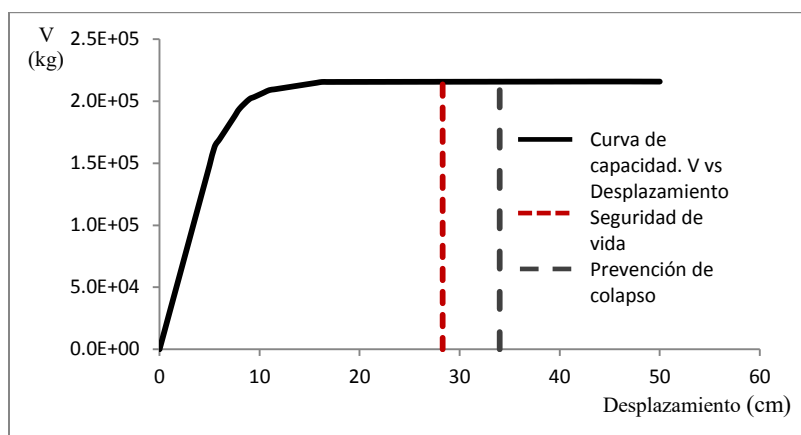


Figura.A.2.118 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M078

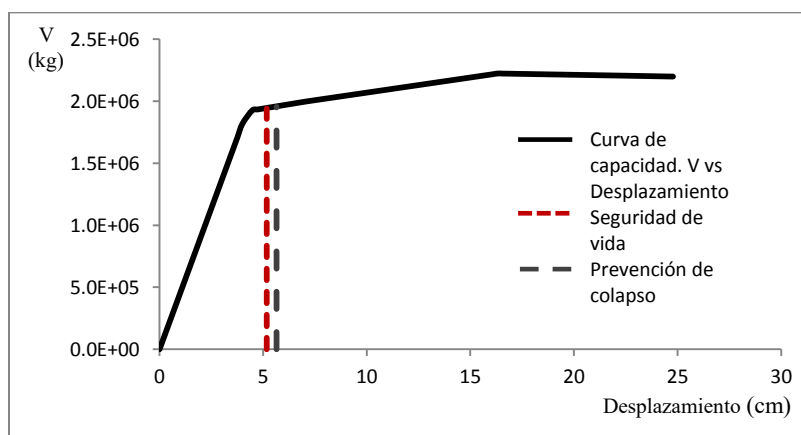


Figura.A.2.119 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M001

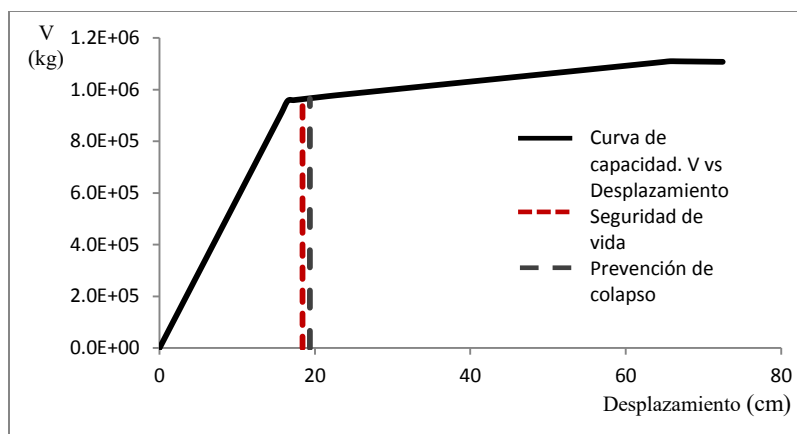


Figura.A.2.120 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M002

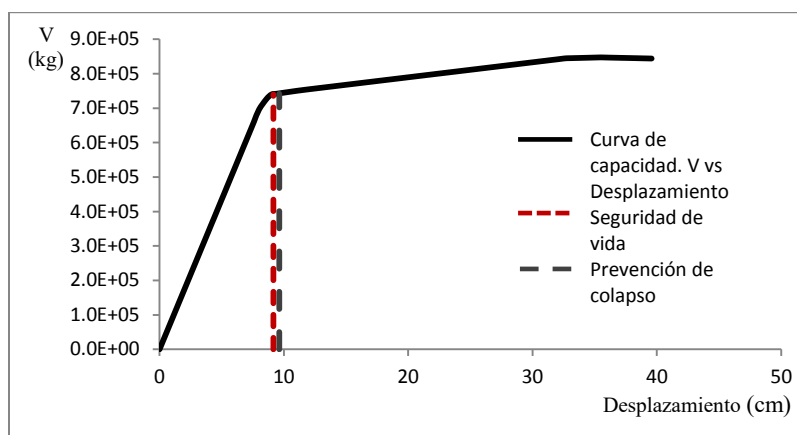


Figura.A.2.121 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M003

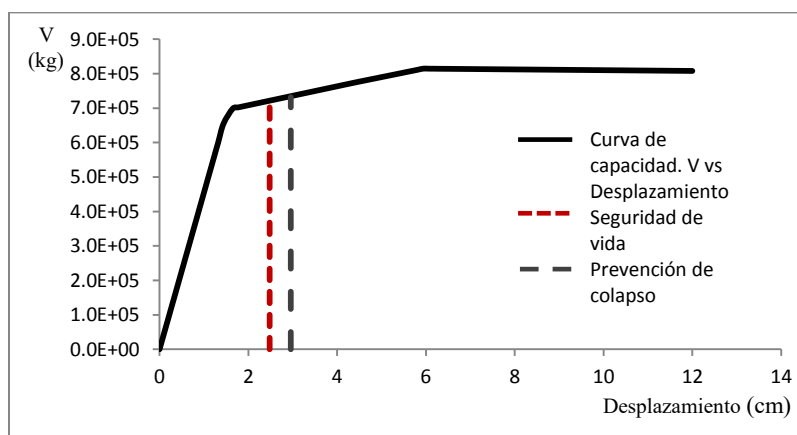


Figura.A.2.122 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M014

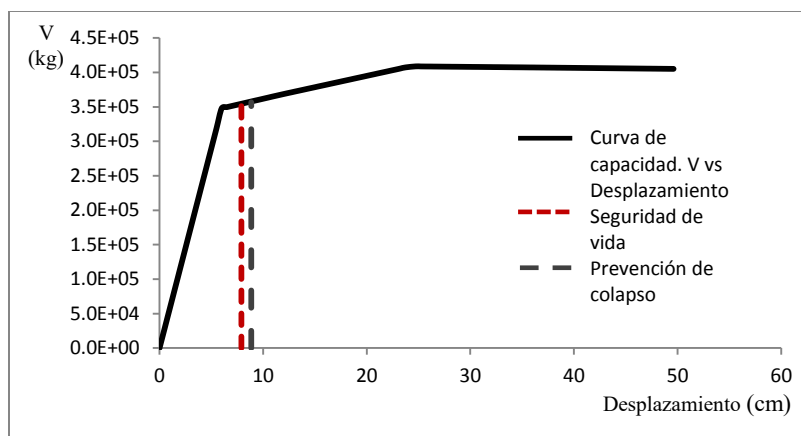


Figura.A.2.123 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M015

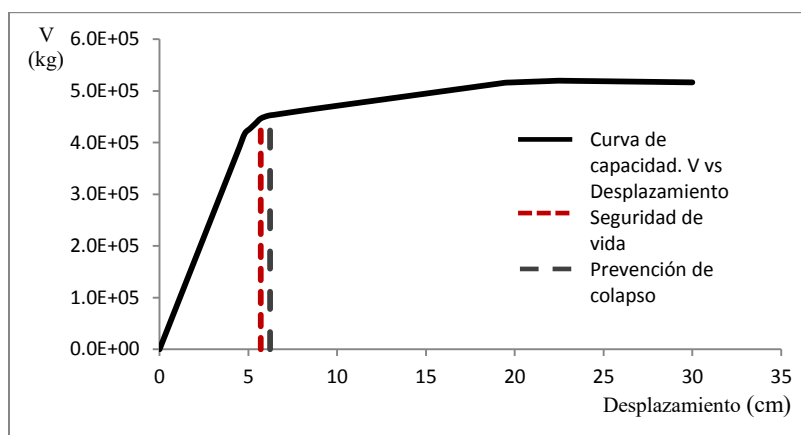


Figura.A.2.124 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M016

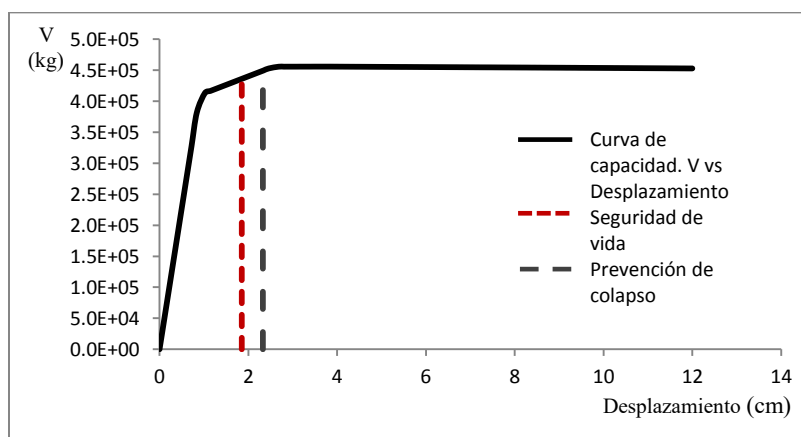


Figura.A.2.125 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M027

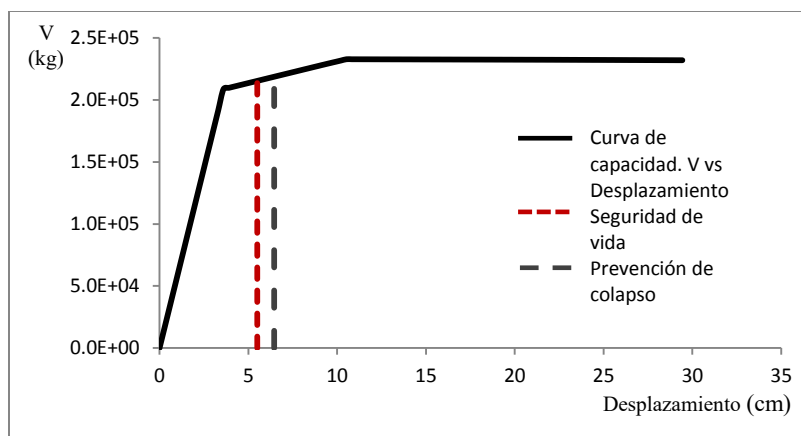


Figura.A.2.126 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M028

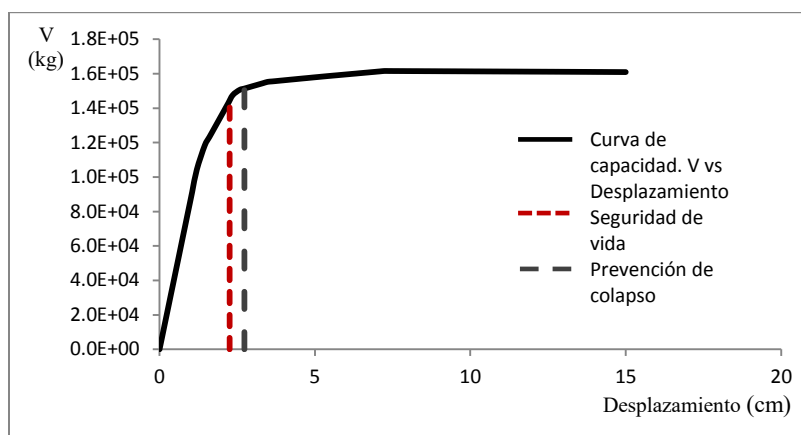


Figura.A.2.127 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M029

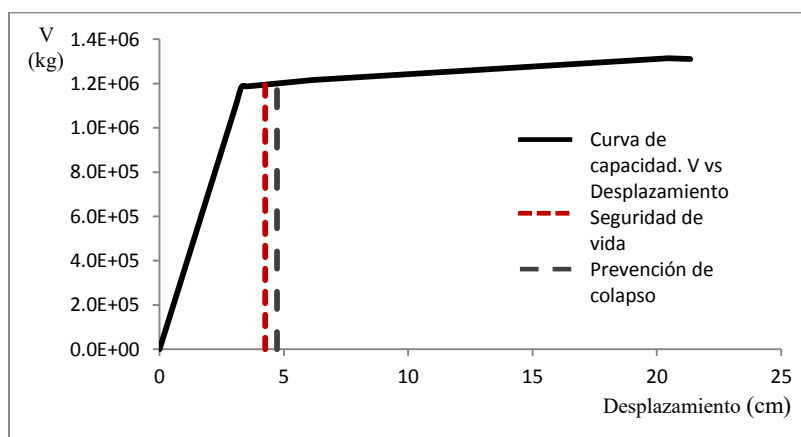


Figura.A.2.128 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M004

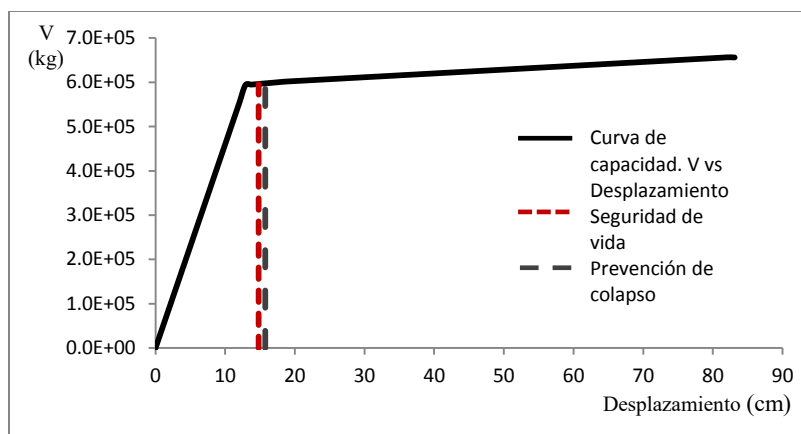


Figura.A.2.129 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M005

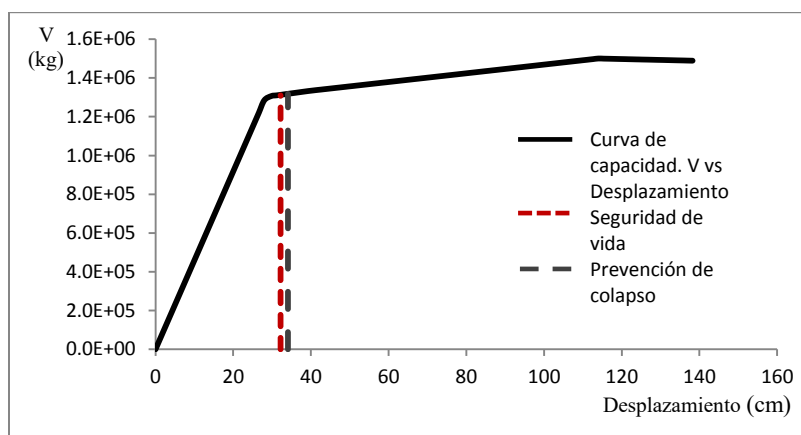


Figura.A.2.130 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M006

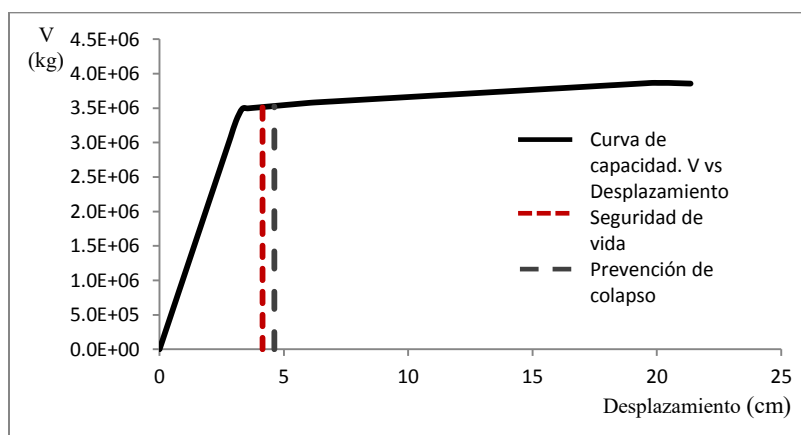


Figura.A.2.131 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M007

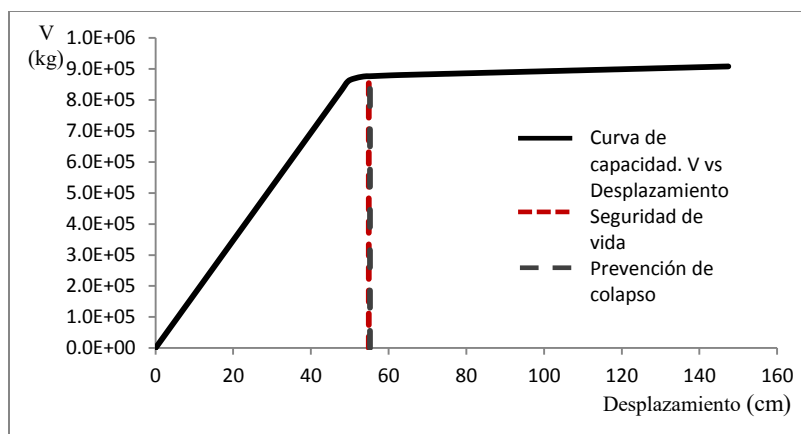


Figura.A.2.132 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M008

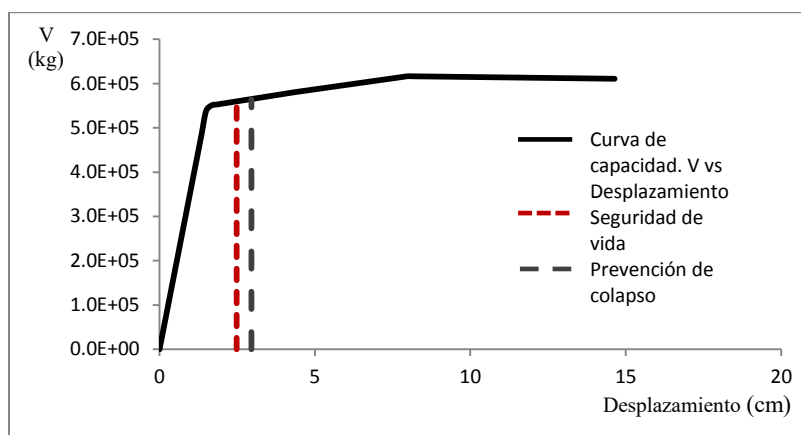


Figura.A.2.133 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M017

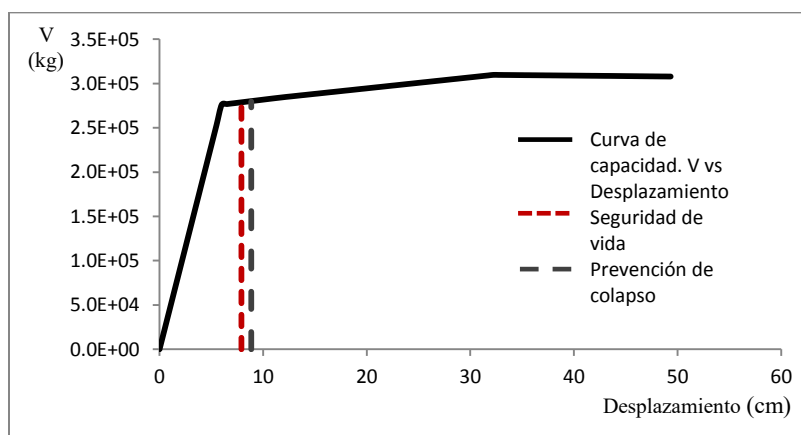


Figura.A.2.134 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M018

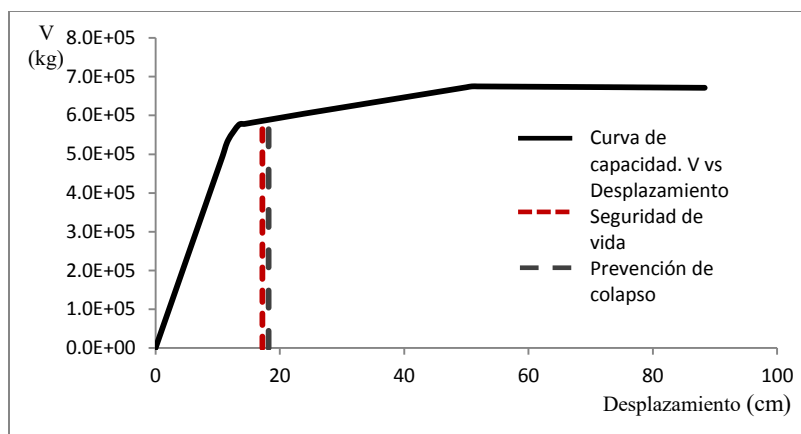


Figura.A.2.135 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M019

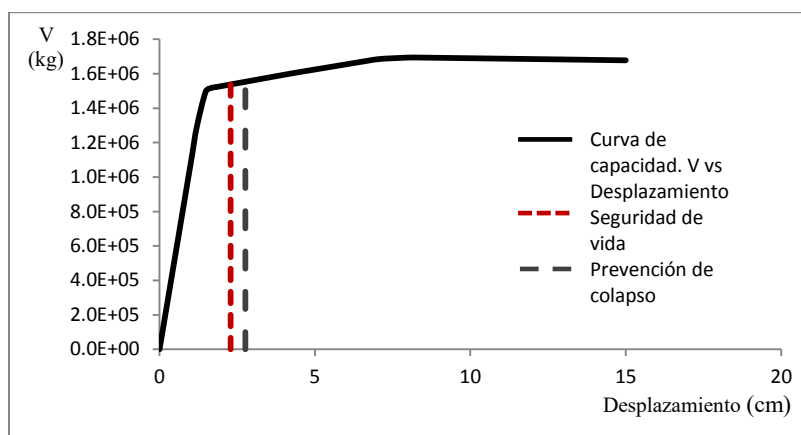


Figura.A.2.136 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M020

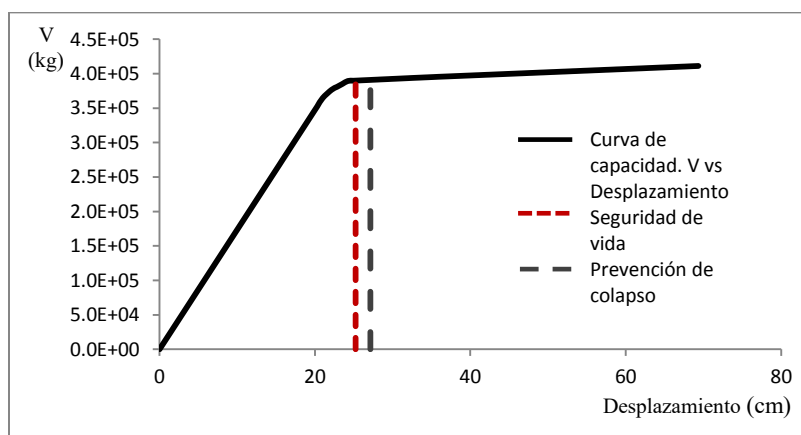


Figura.A.2.137 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M021

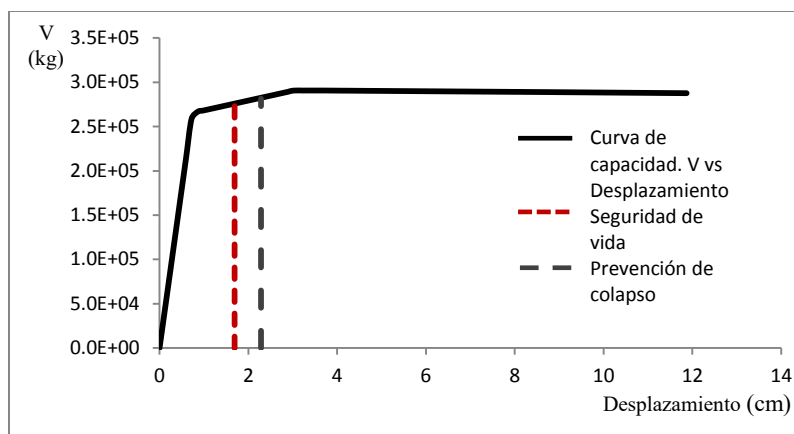


Figura.A.2.138 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M030

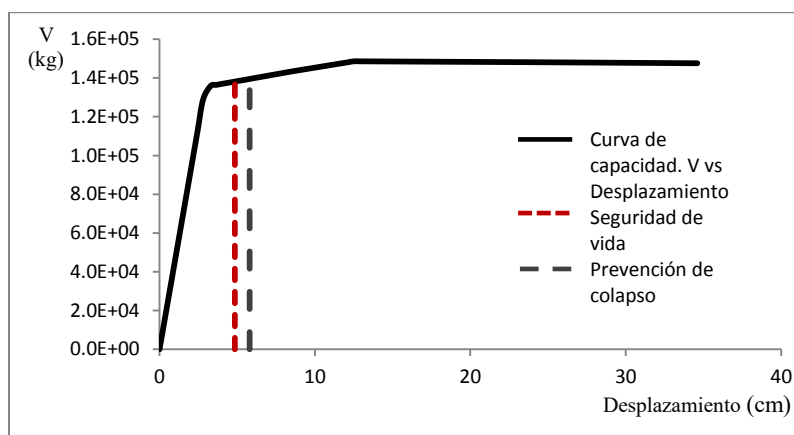


Figura.A.2.139 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M031

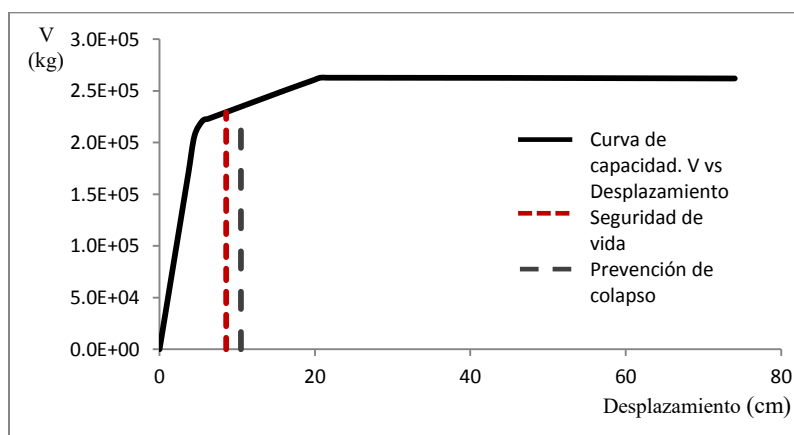


Figura.A.2.140 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M032

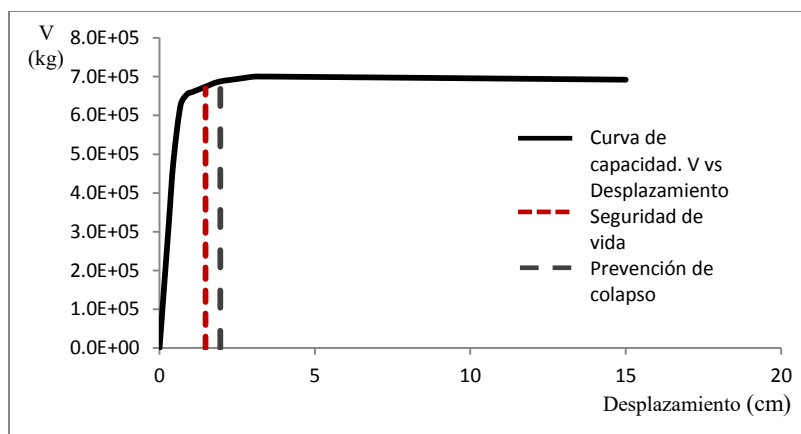


Figura.A.2.141 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M033

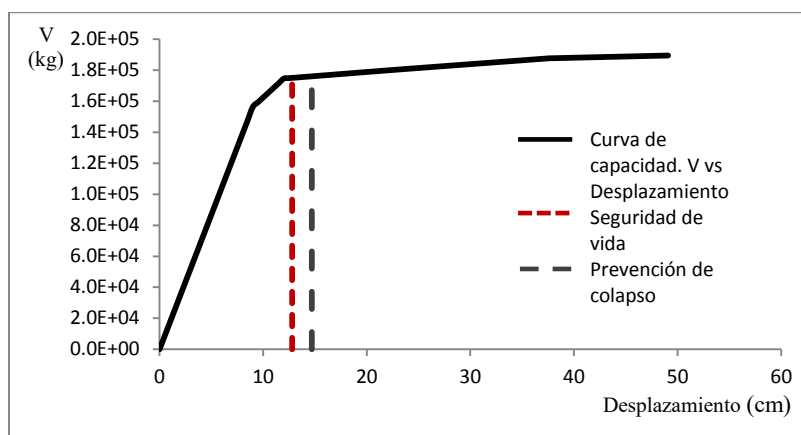


Figura.A.2.142 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M034

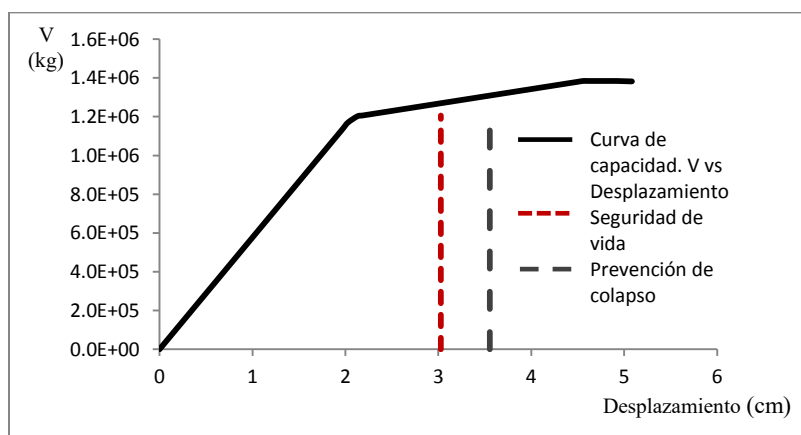


Figura.A.2.143 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M009

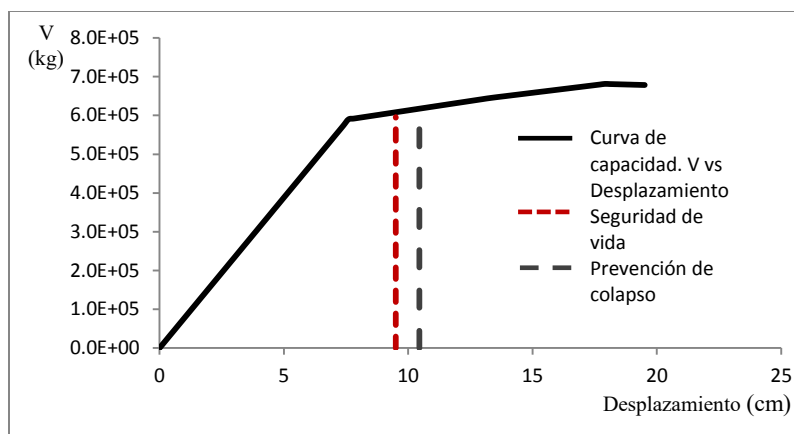


Figura.A.2.144 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M010

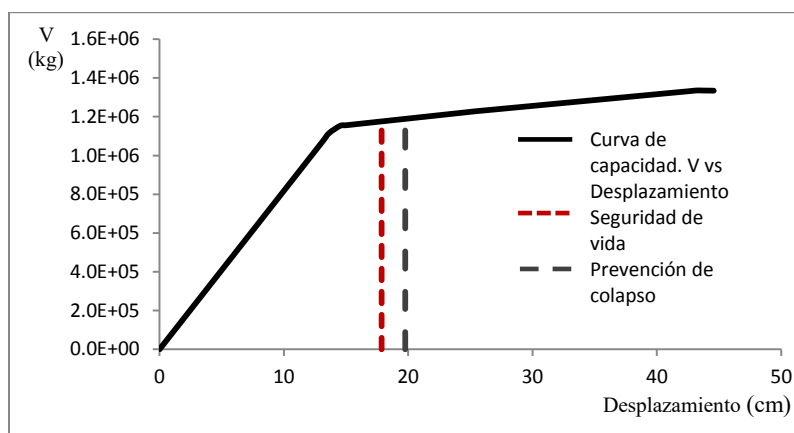


Figura.A.2.145 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M011

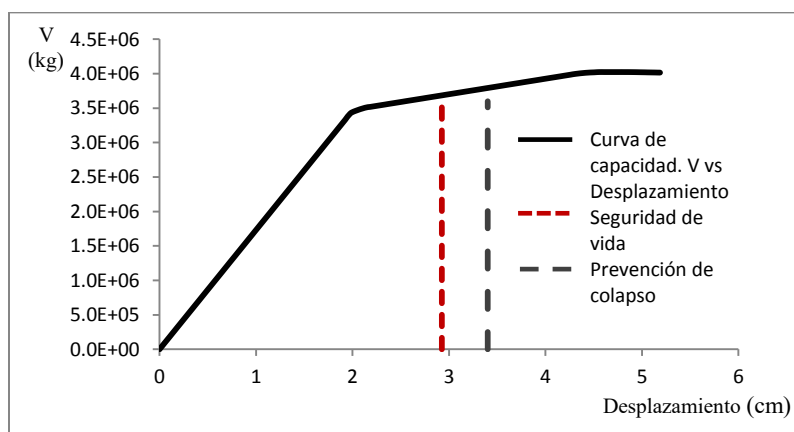


Figura.A.2.146 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M012

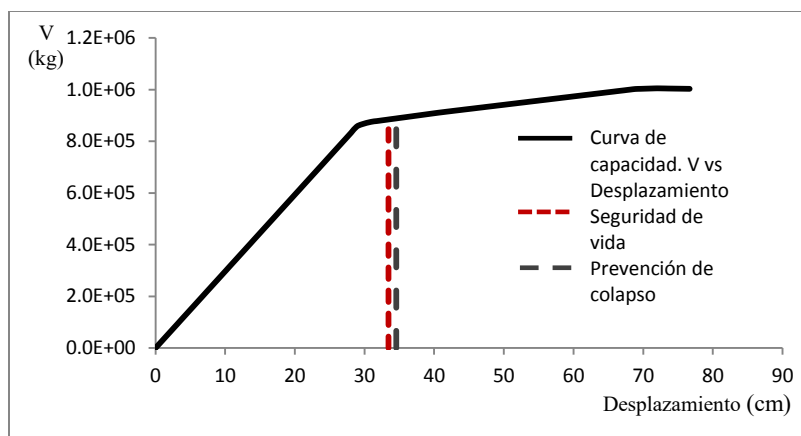


Figura.A.2.147 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M013

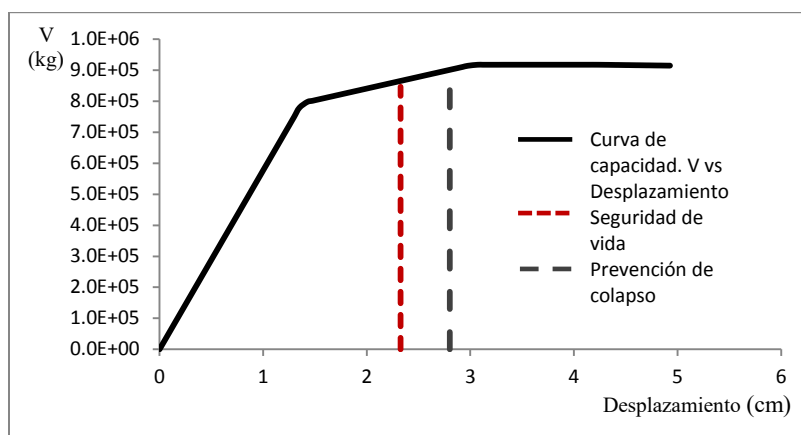


Figura.A.2.148 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M022

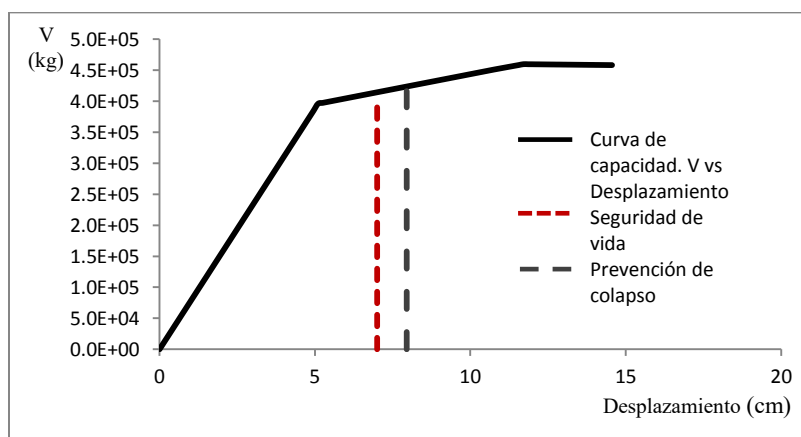


Figura.A.2.149 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M023

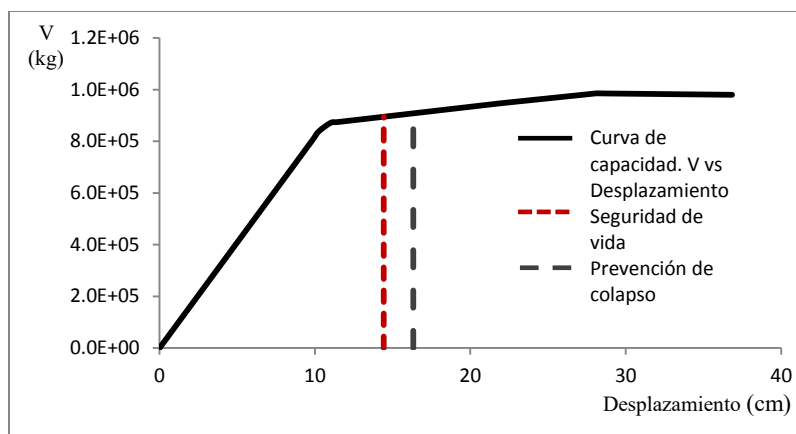


Figura.A.2.150 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M024

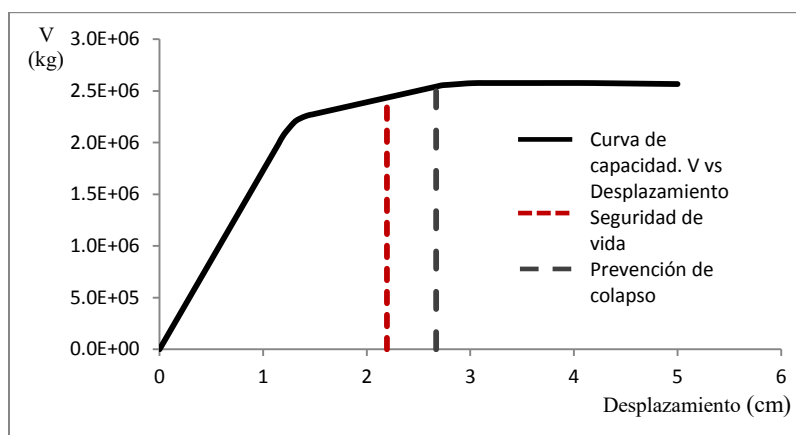


Figura.A.2.151 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M025

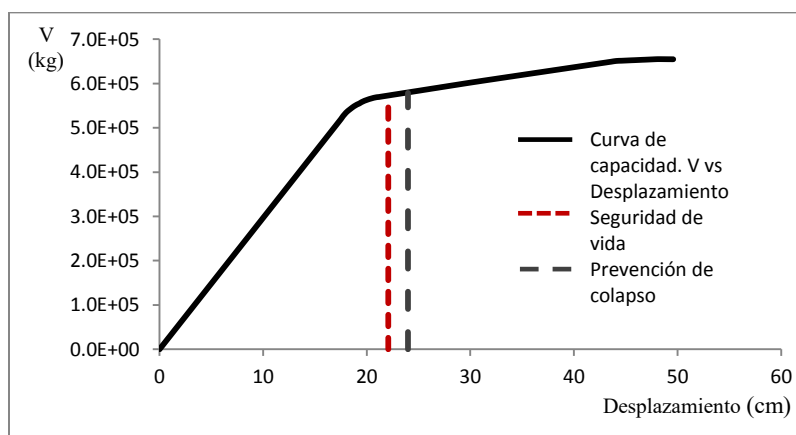


Figura.A.2.152 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M026

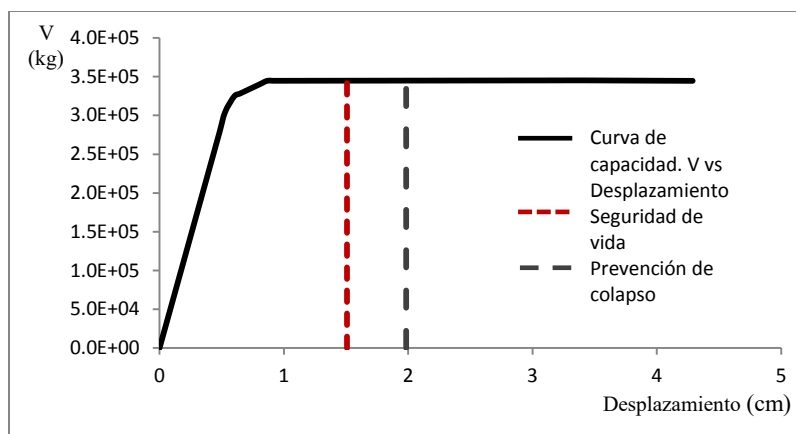


Figura.A.2.153 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M035

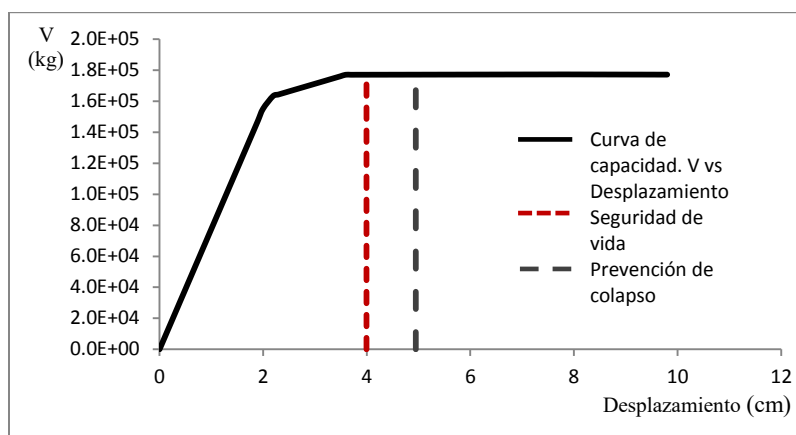


Figura.A.2.154 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M036

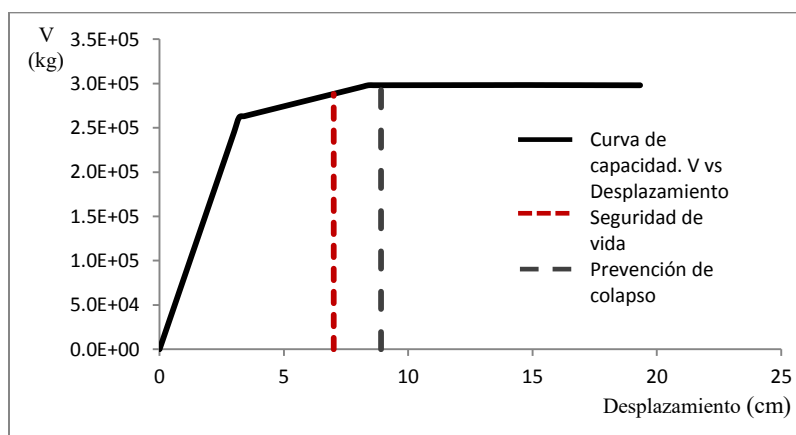


Figura.A.2.155 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M037

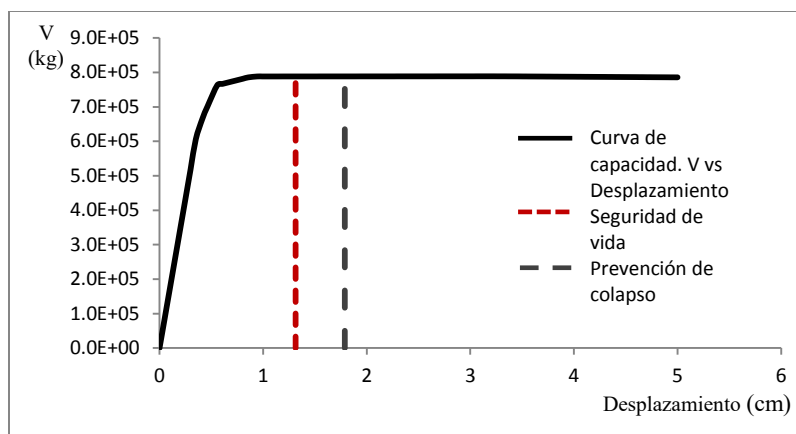


Figura.A.2.156 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M038

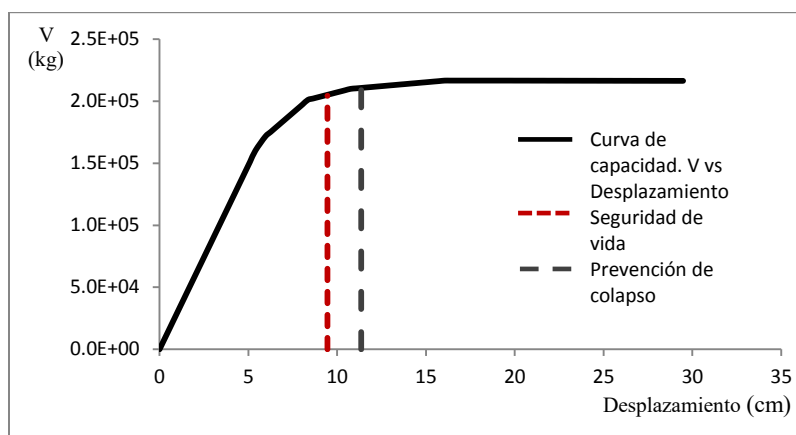


Figura.A.2.157 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M039

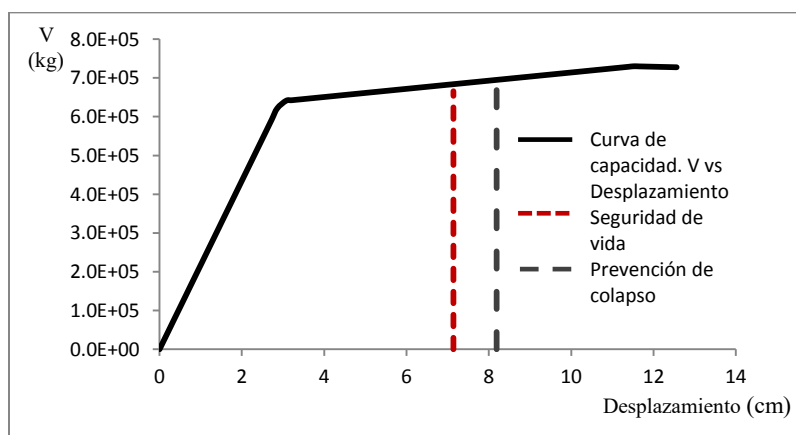


Figura.A.2.158 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M157

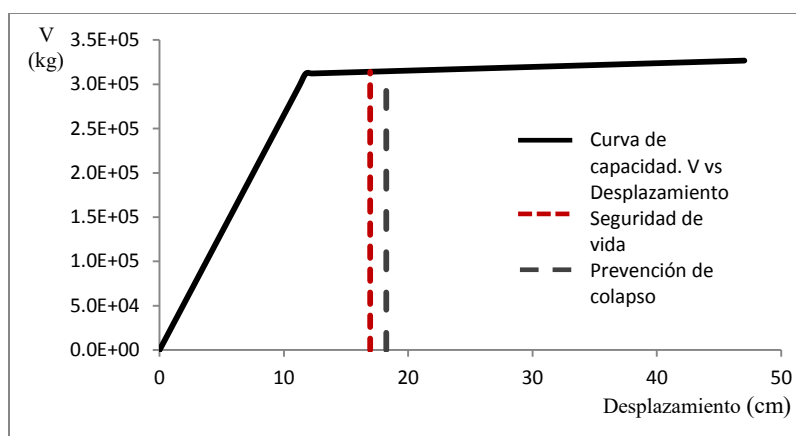


Figura.A.2.159 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M158

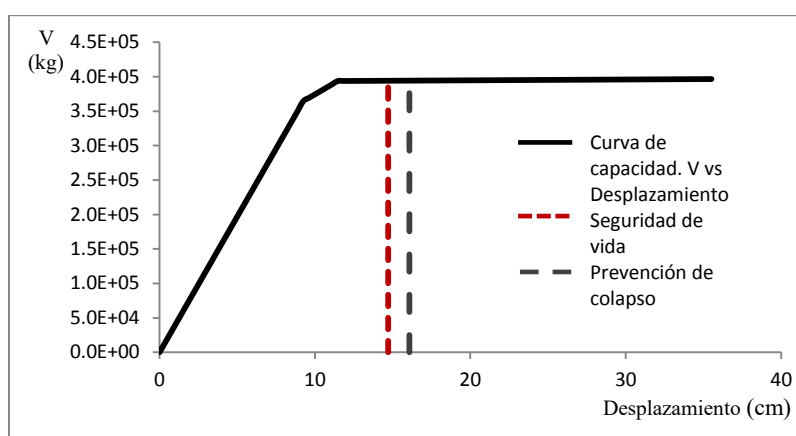


Figura.A.2.160 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M159

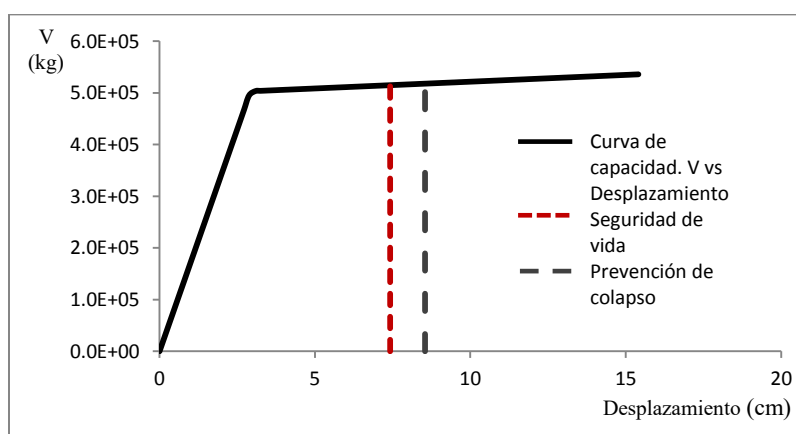


Figura.A.2.161 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M160

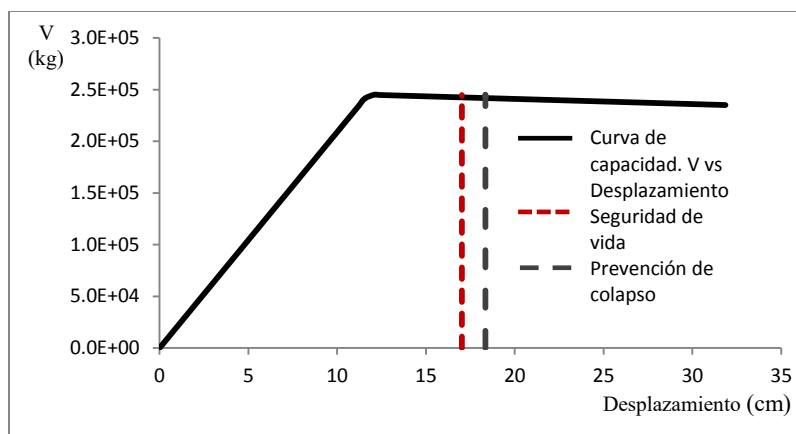


Figura.A.2.162 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M161

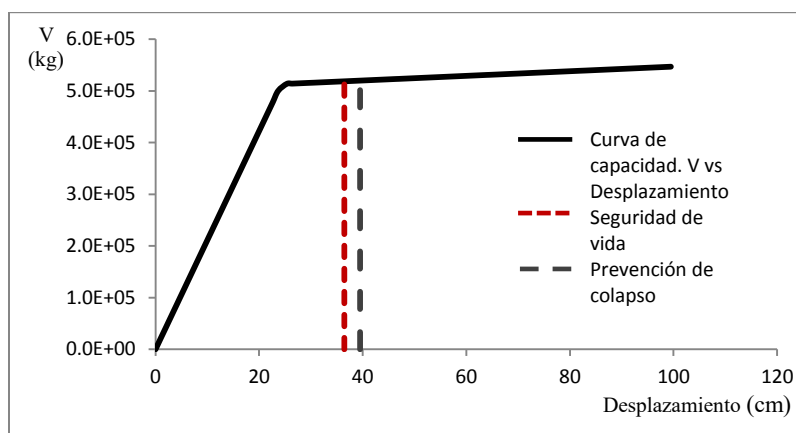


Figura.A.2.163 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M162

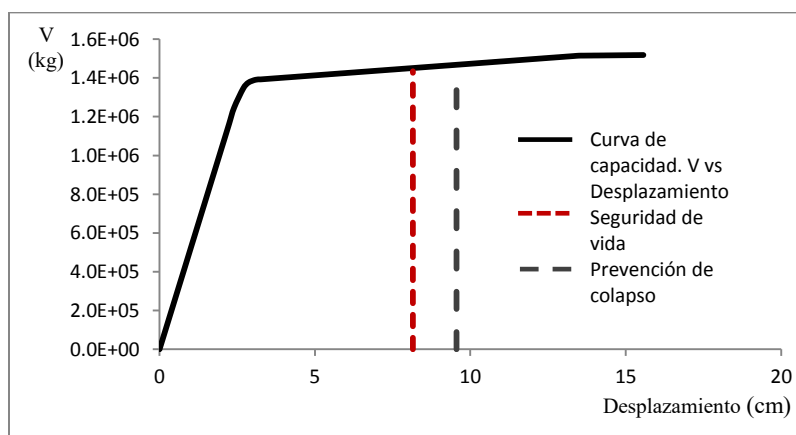


Figura.A.2.164 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M163

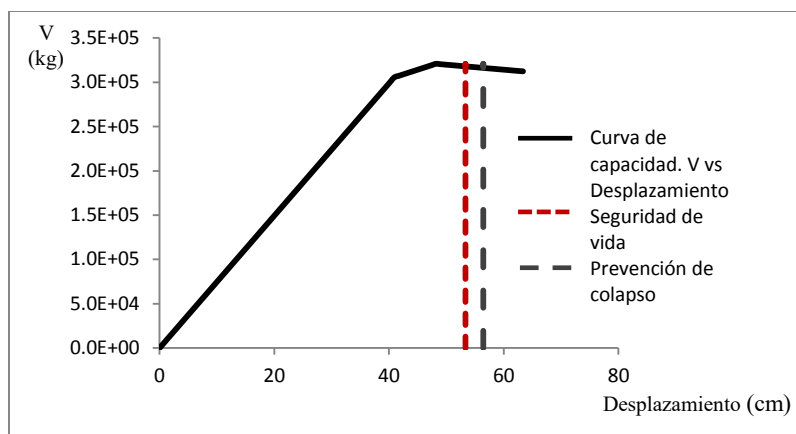


Figura.A.2.165 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M164

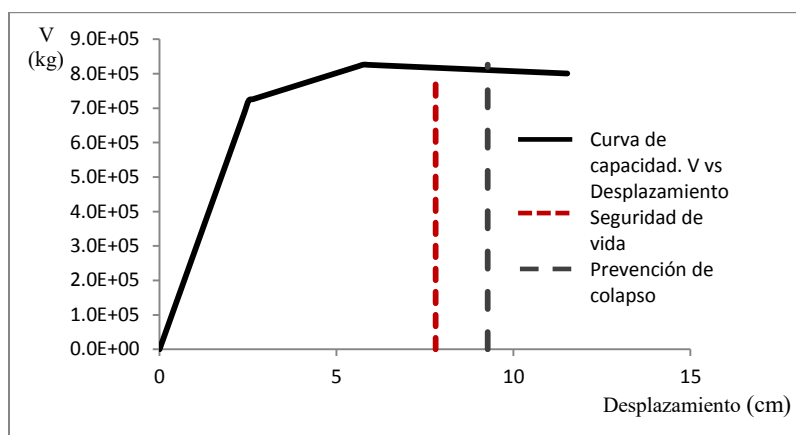


Figura.A.2.166 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M165

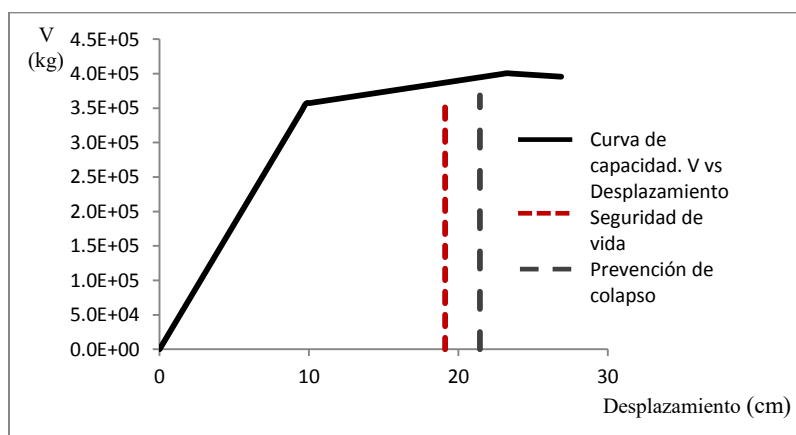


Figura.A.2.167 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M166

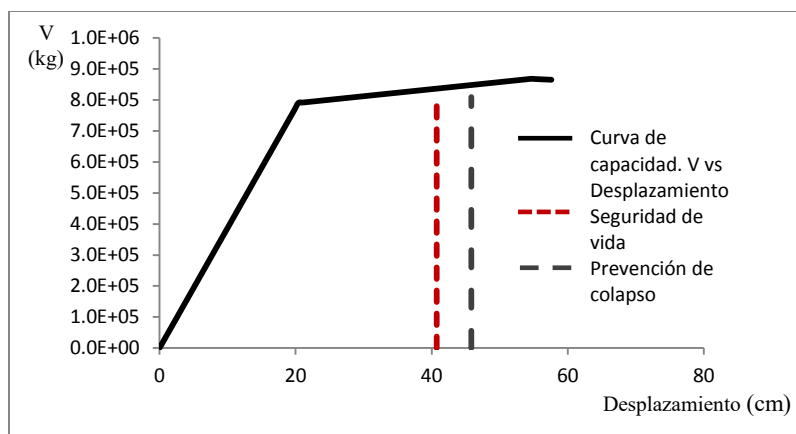


Figura.A.2.168 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M167

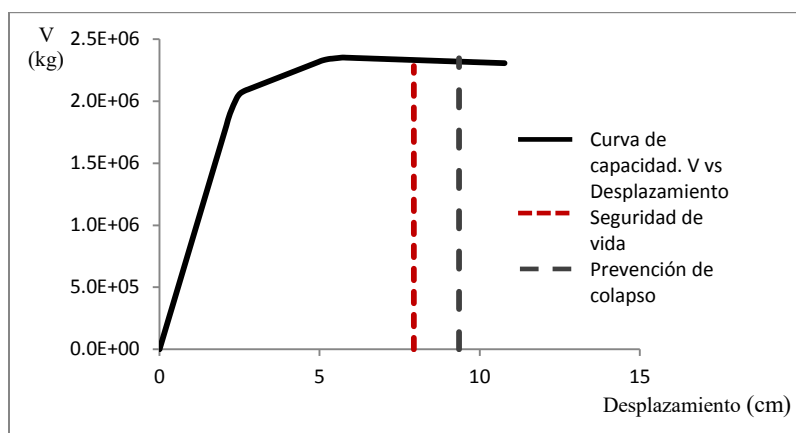


Figura.A.2.169 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M168

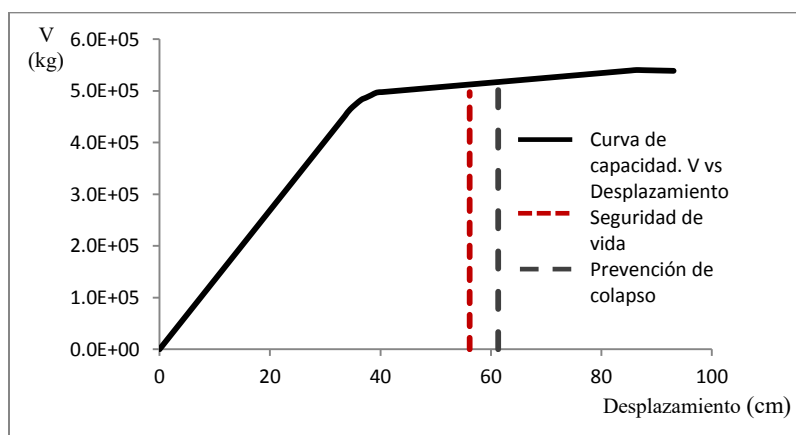


Figura.A.2.170 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M169

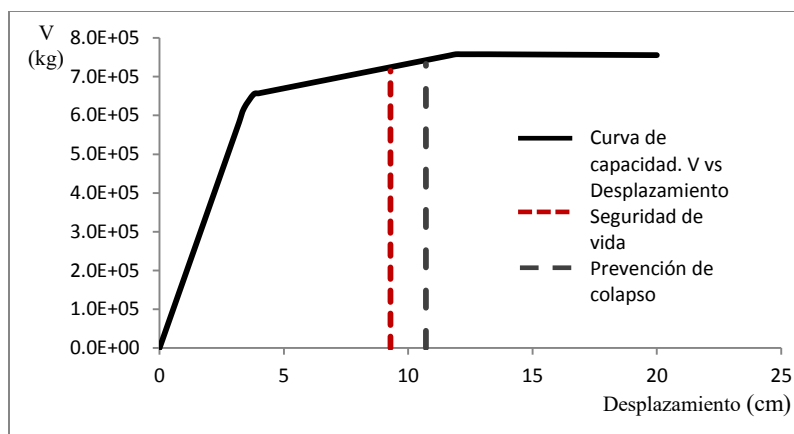


Figura.A.2.171 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M170

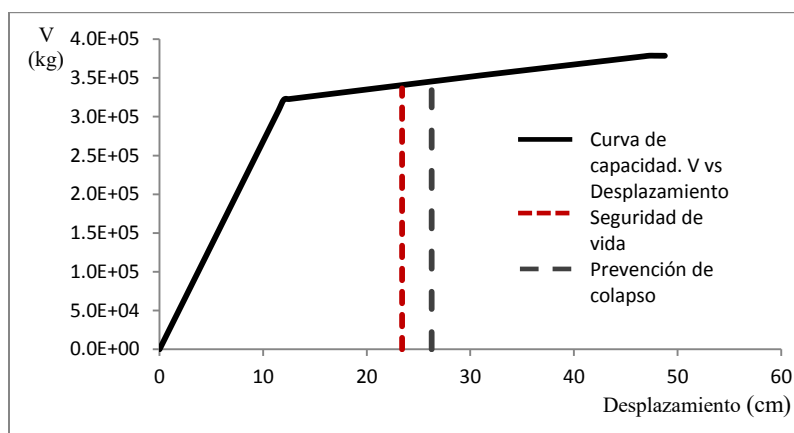


Figura.A.2.172 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M171

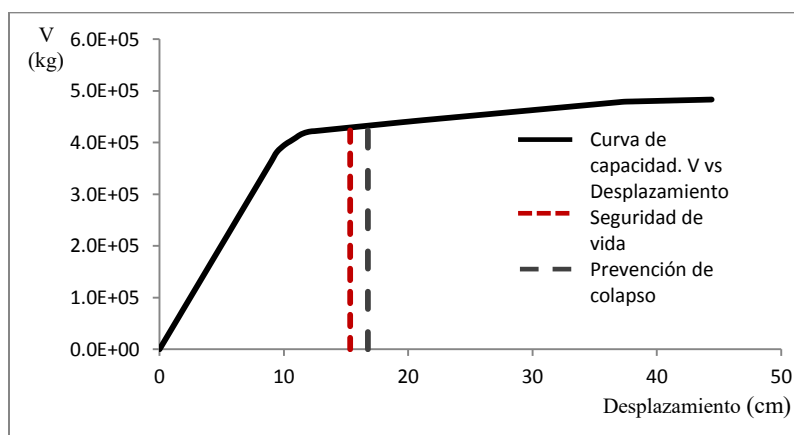


Figura.A.2.173 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M172

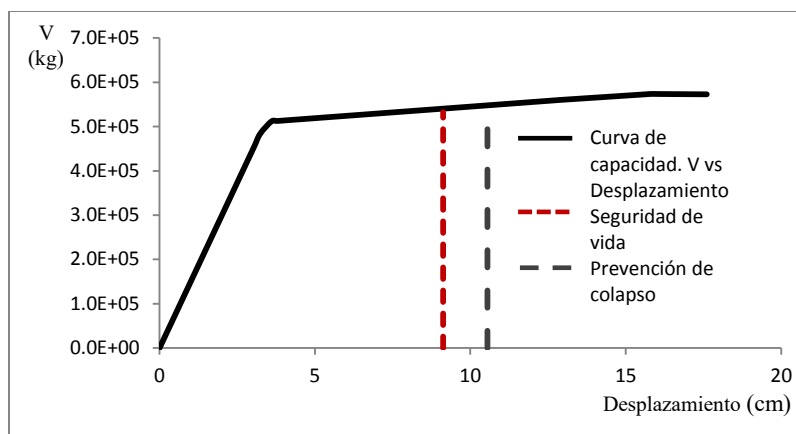


Figura.A.2.174 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173

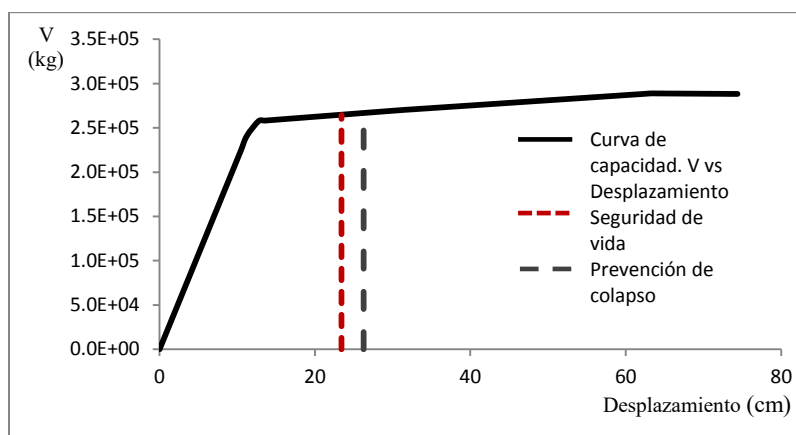


Figura.A.2.175 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M174

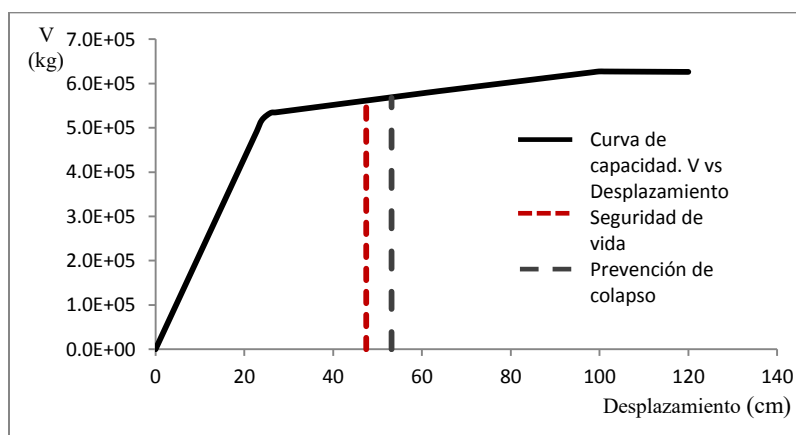


Figura.A.2.176 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M175

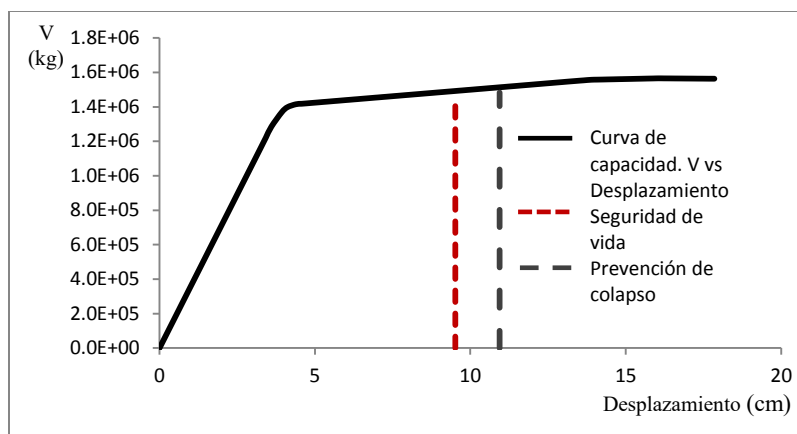


Figura.A.2.177 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M176

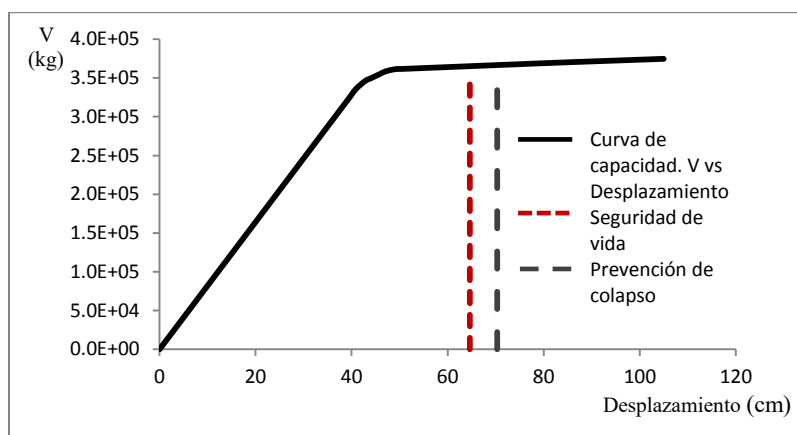


Figura.A.2.178 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M177

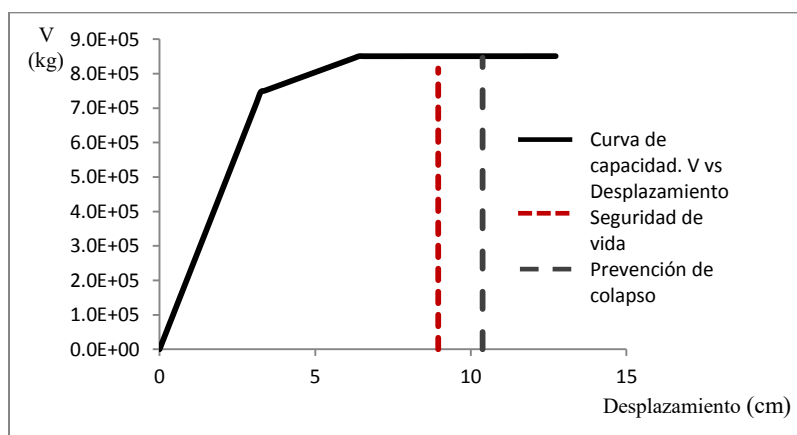


Figura.A.2.179 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M178

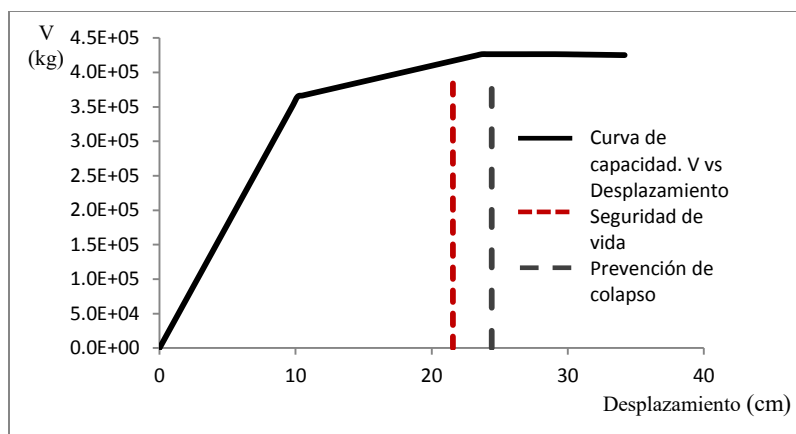


Figura.A.2.180 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M179

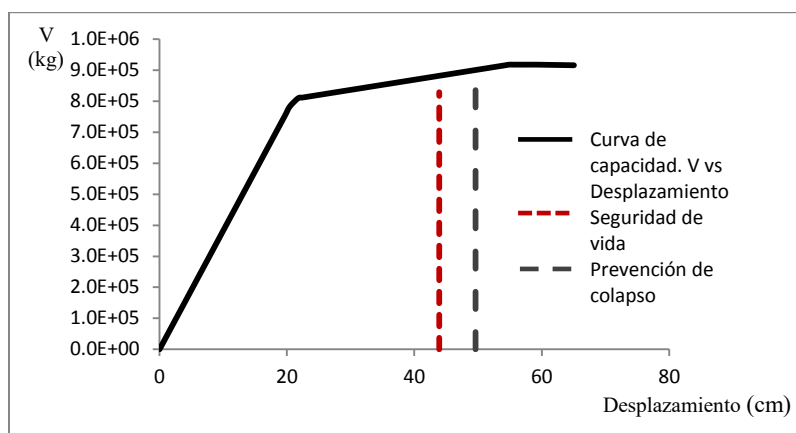


Figura.A.2.181 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M180

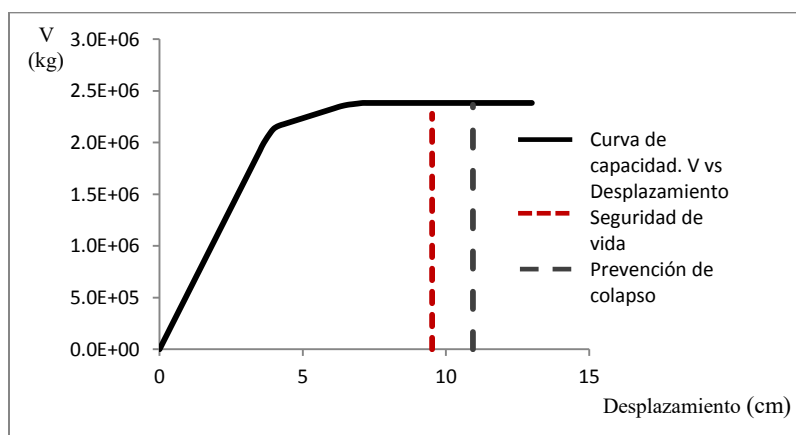


Figura.A.2.182 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M181

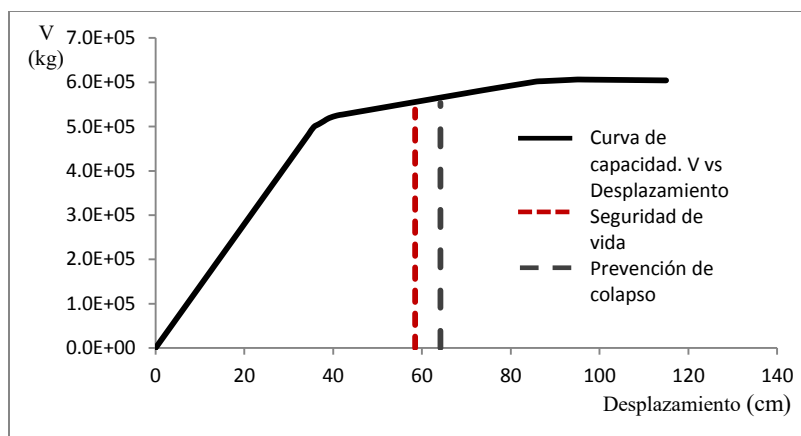


Figura.A.2.183 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M182

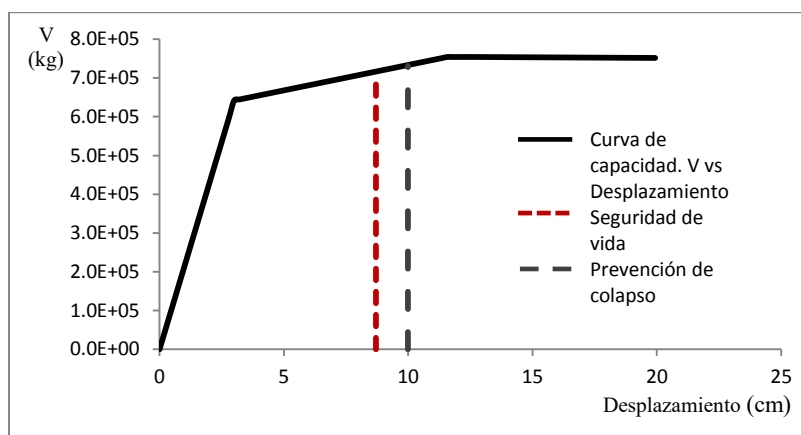


Figura.A.2.184 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M183

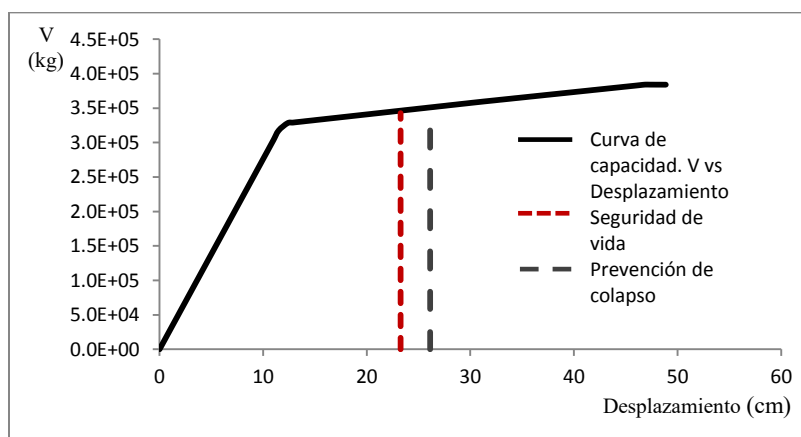


Figura.A.2.185 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M184

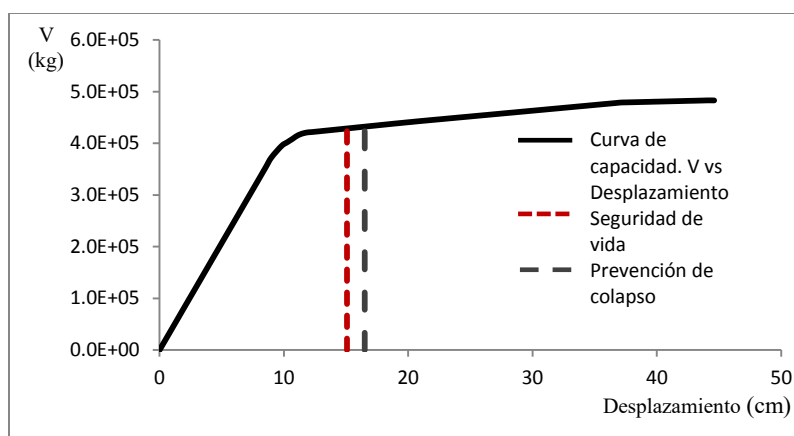


Figura.A.2.186 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M185

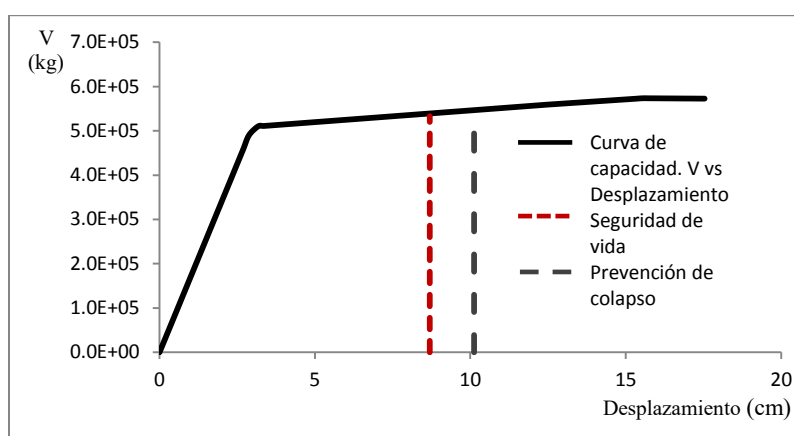


Figura.A.2.187 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186

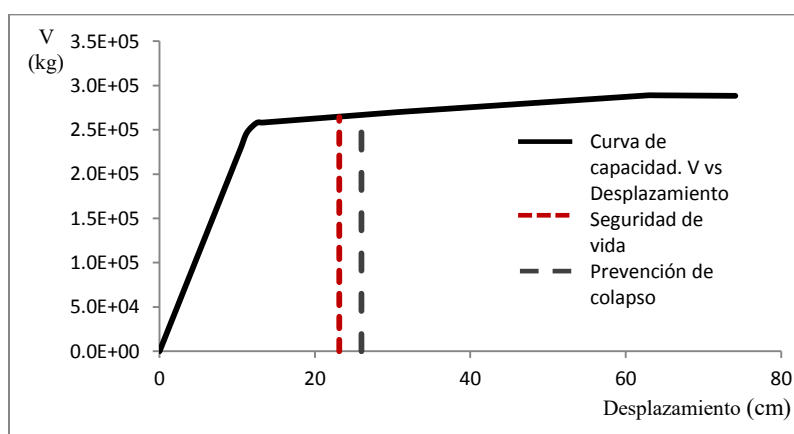


Figura.A.2.188 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M187

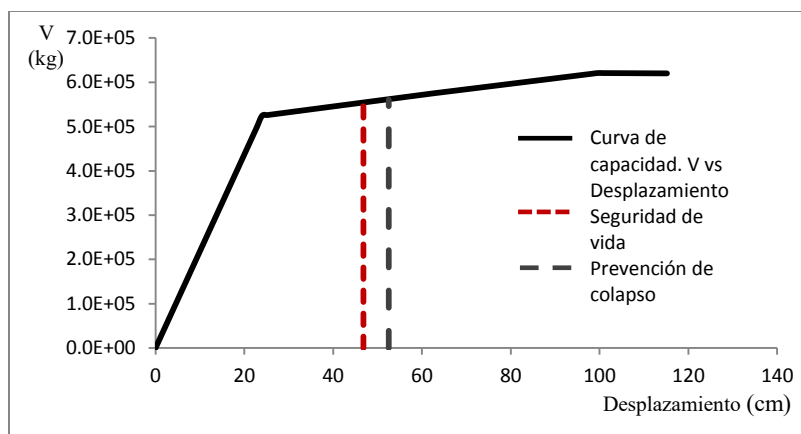


Figura.A.2.189 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M188

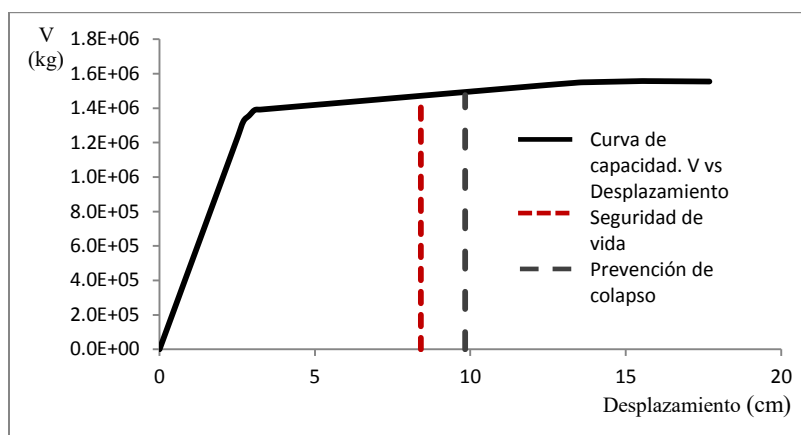


Figura.A.2.190 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M189

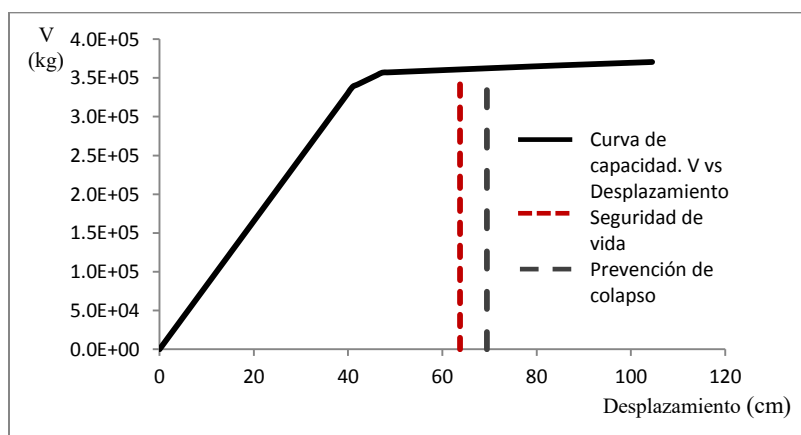


Figura.A.2.191 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M190

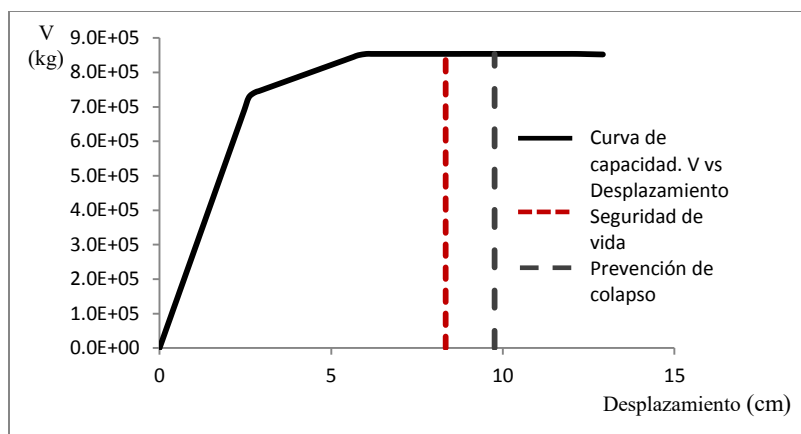


Figura.A.2.192 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M191

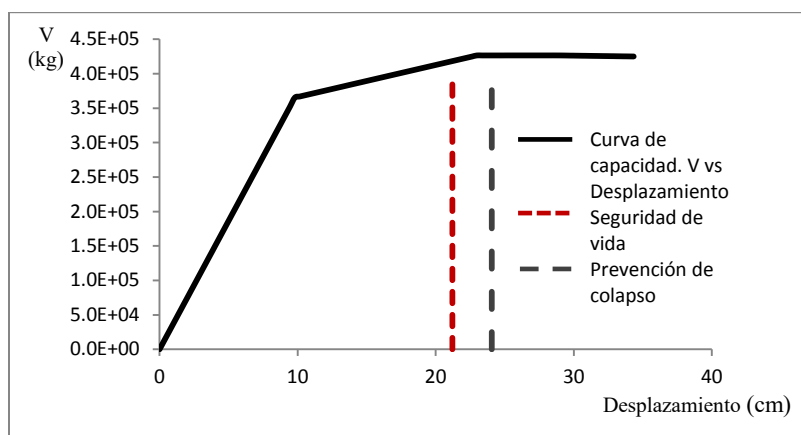


Figura.A.2.193 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M192

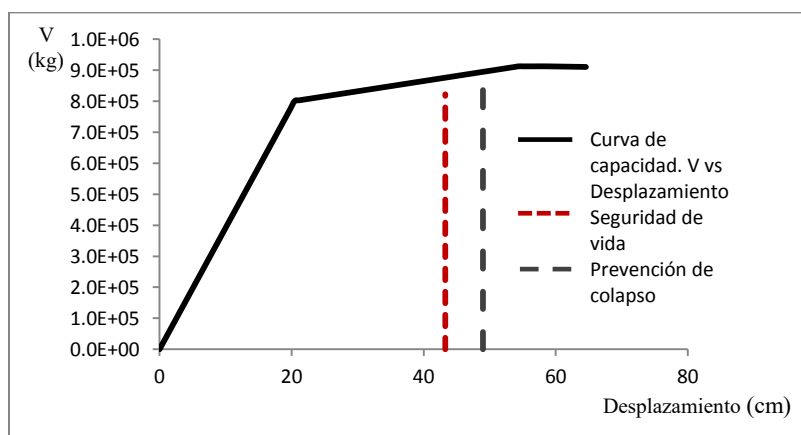


Figura.A.2.194 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M193

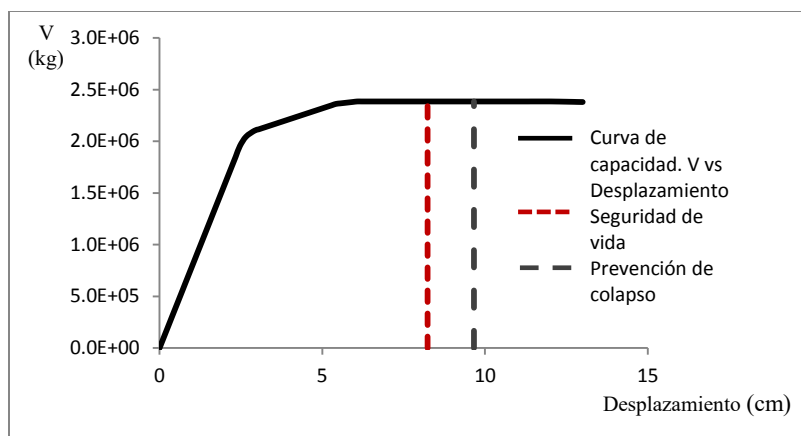


Figura.A.2.195 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M194

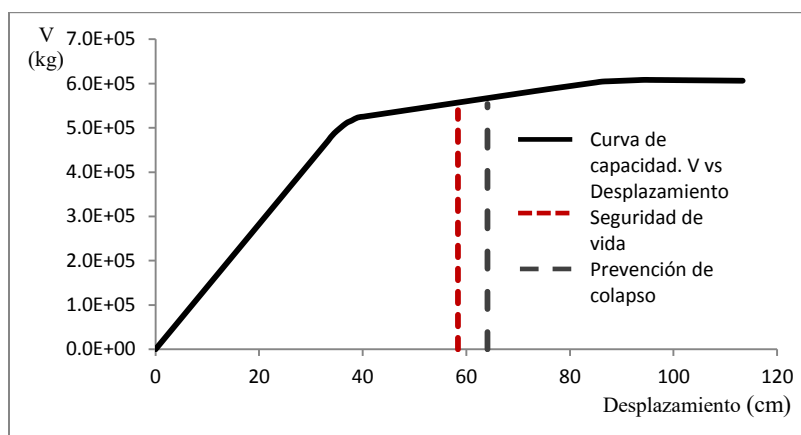


Figura.A.2.196 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M195

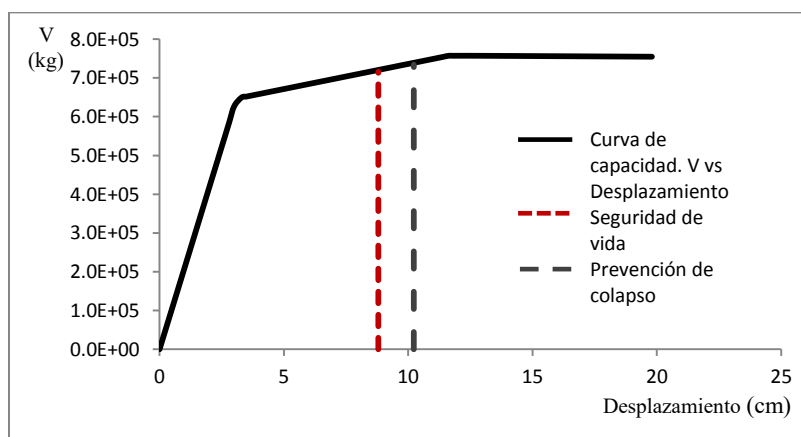


Figura.A.2.197 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M196

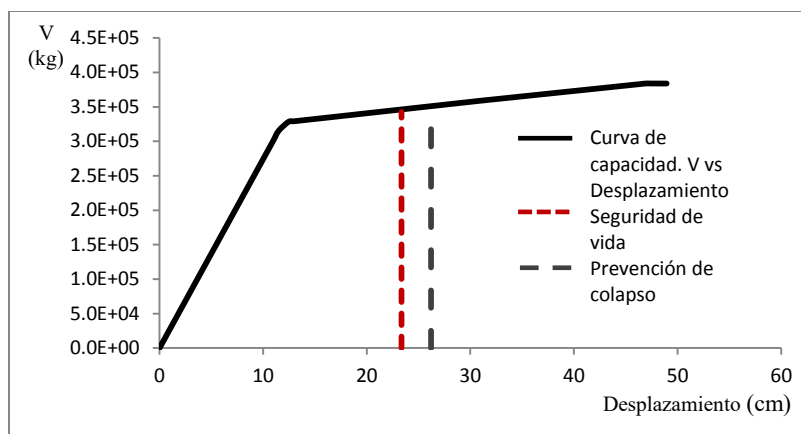


Figura.A.2.198 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M197

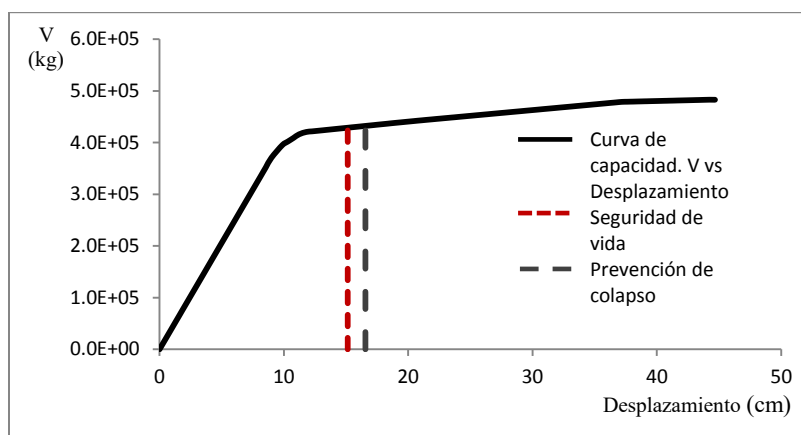


Figura.A.2.199 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M198

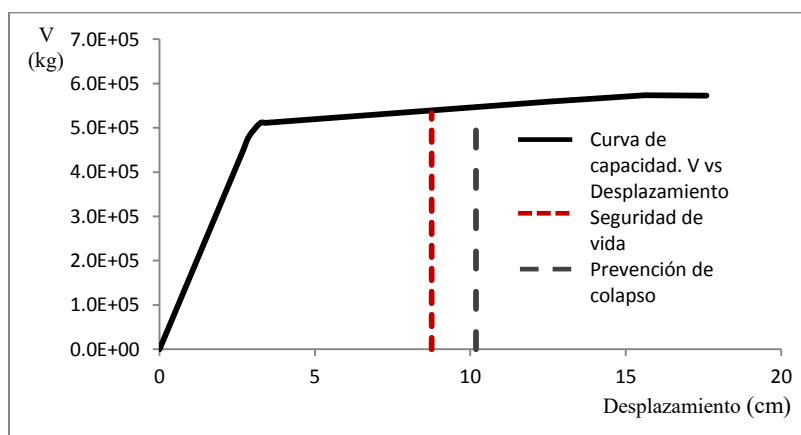


Figura.A.2.200 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199

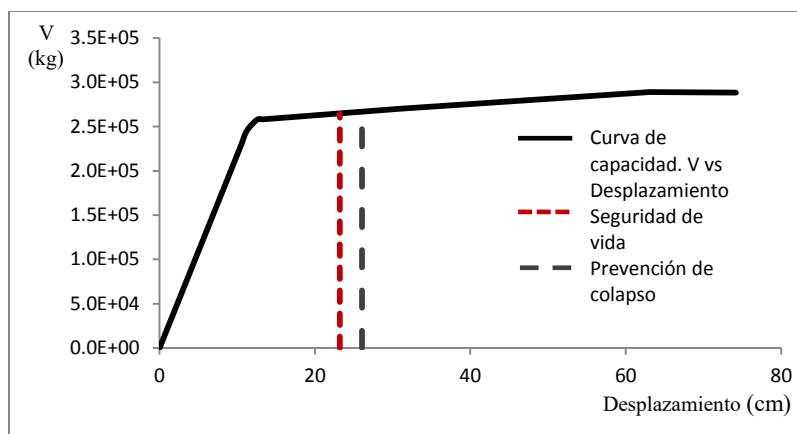


Figura.A.2.201 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M200

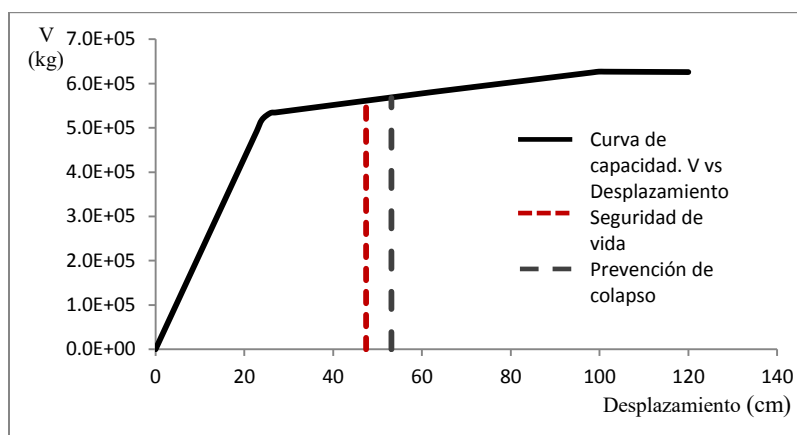


Figura.A.2.202 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M201

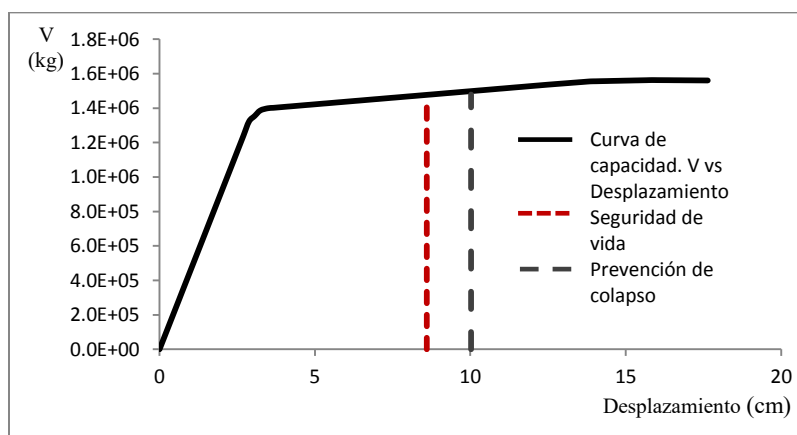


Figura.A.2.203 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M202

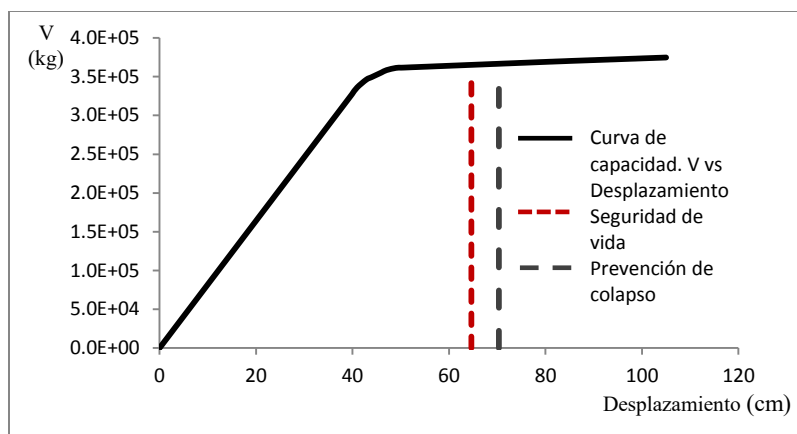


Figura.A.2.204 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M203

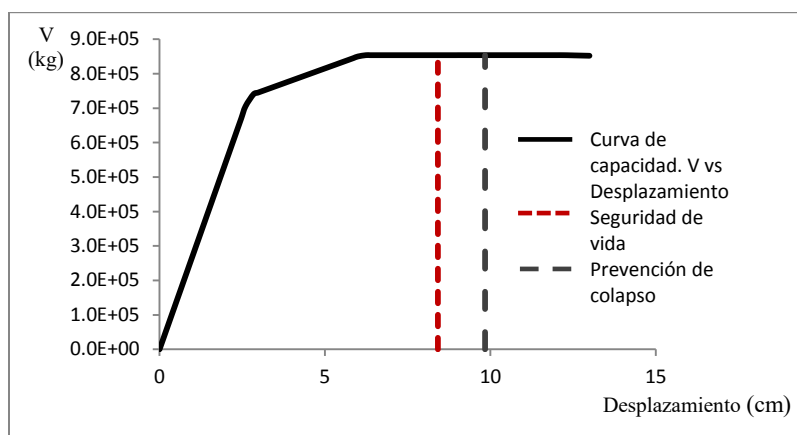


Figura.A.2.205 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M204

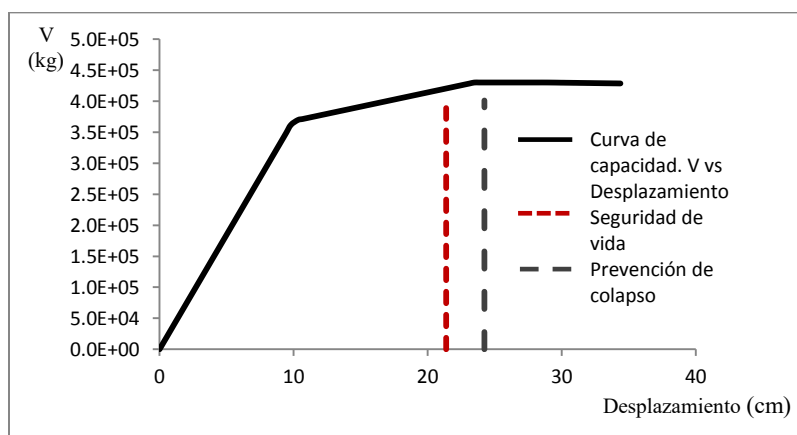


Figura.A.2.206 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M205

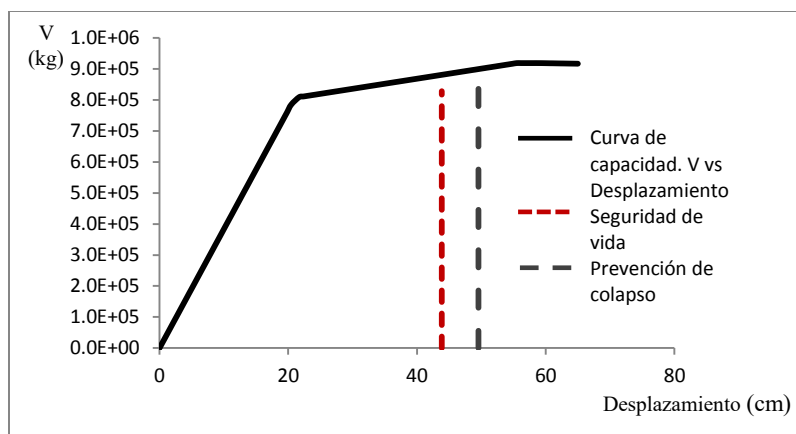


Figura.A.2.207 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M206

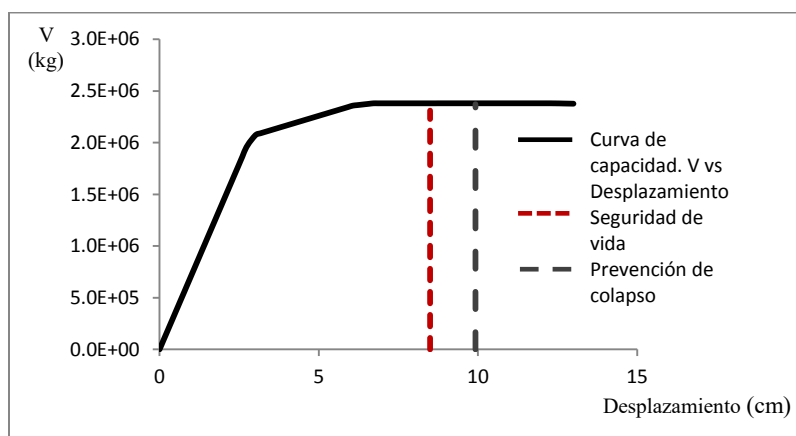


Figura.A.2.208 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M207

A.3 Curvas de capacidad de los modelos de análisis en dirección transversal

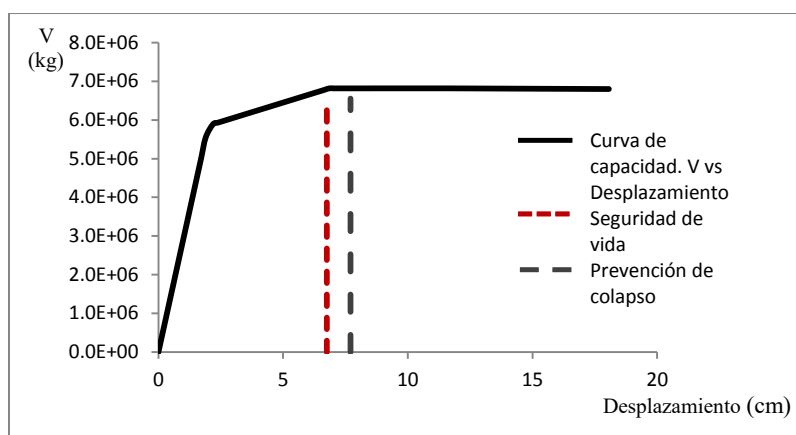


Figura.A.3.1 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M118

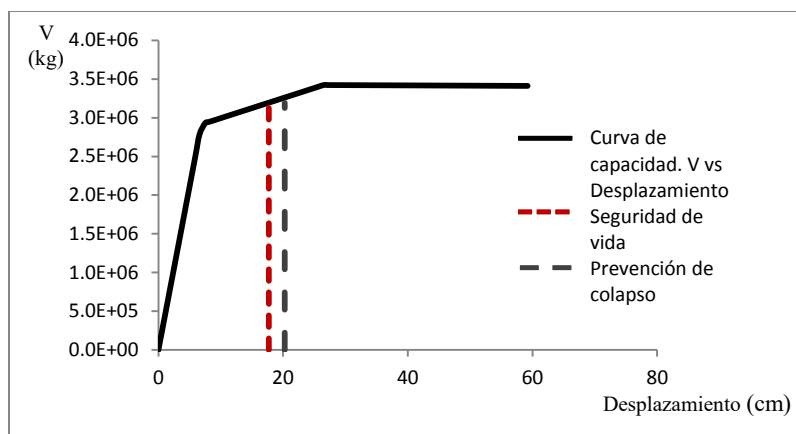


Figura.A.3.2 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M119

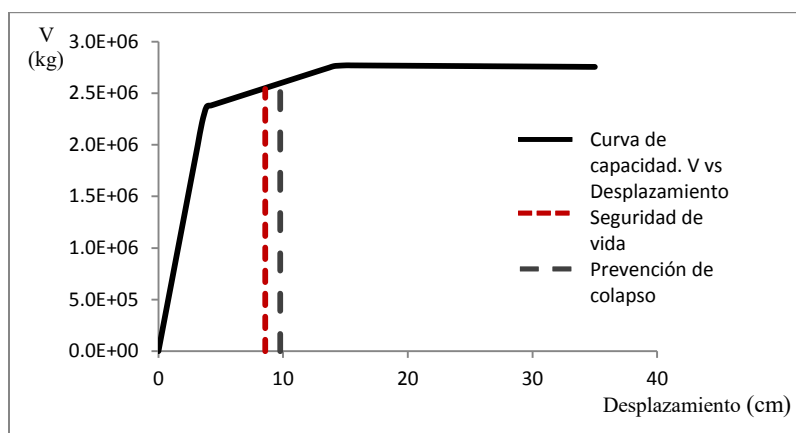


Figura.A.3.3 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M120

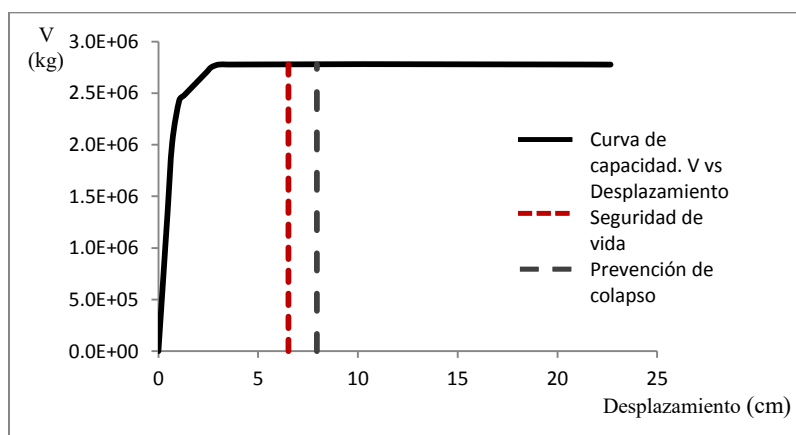


Figura.A.3.4 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M131

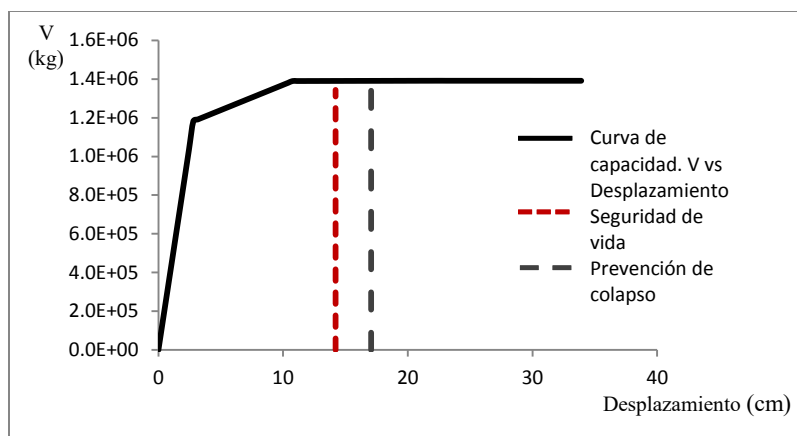


Figura.A.3.5 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M132

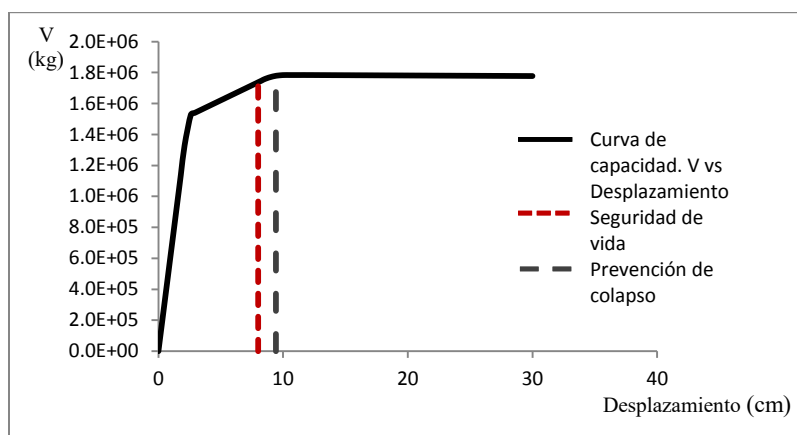


Figura.A.3.6 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M133

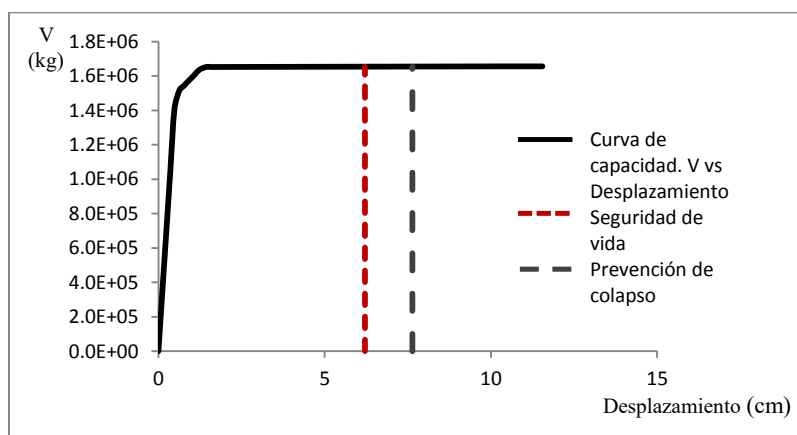


Figura.A.3.7 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M144

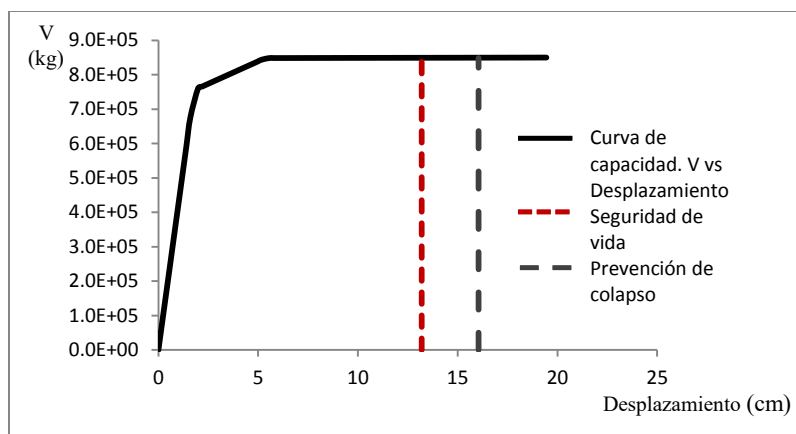


Figura.A.3.8 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M145

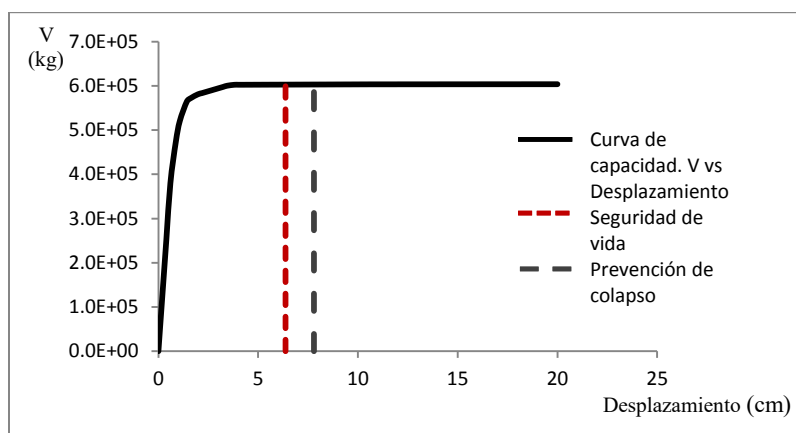


Figura.A.3.9 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M146

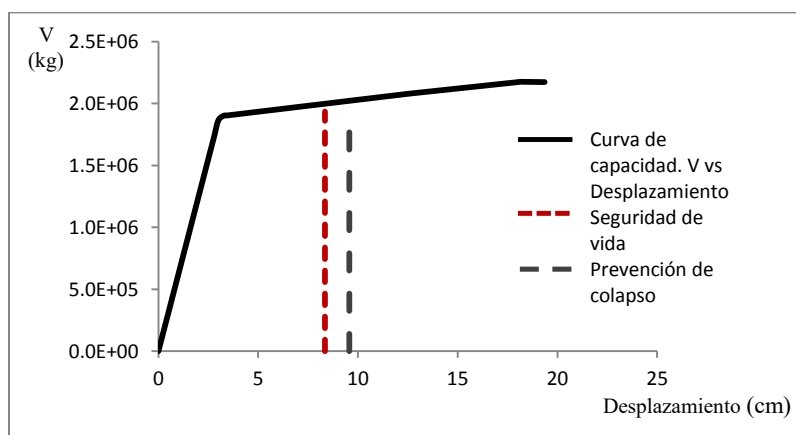


Figura.A.3.10 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M121

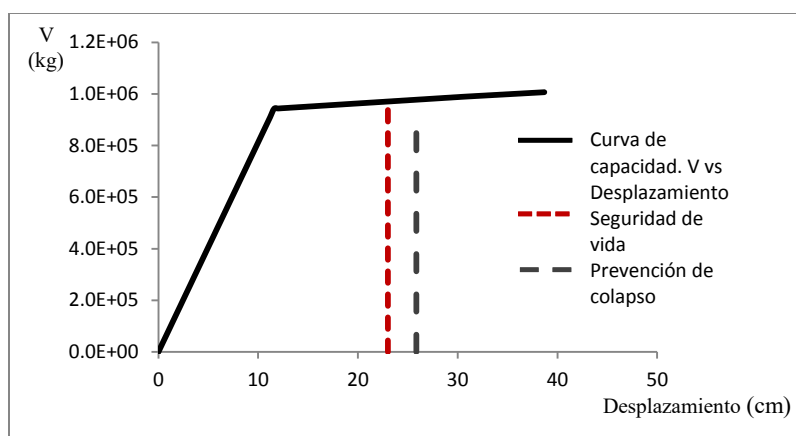


Figura.A.3.11 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M122

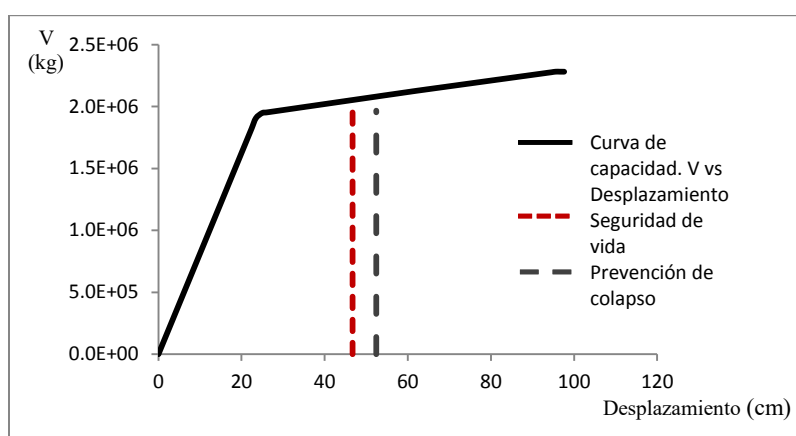


Figura.A.3.12 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M123

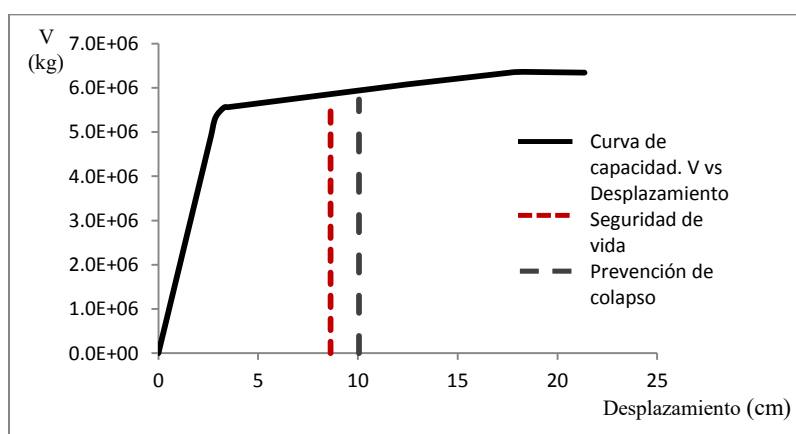


Figura.A.3.13 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M124

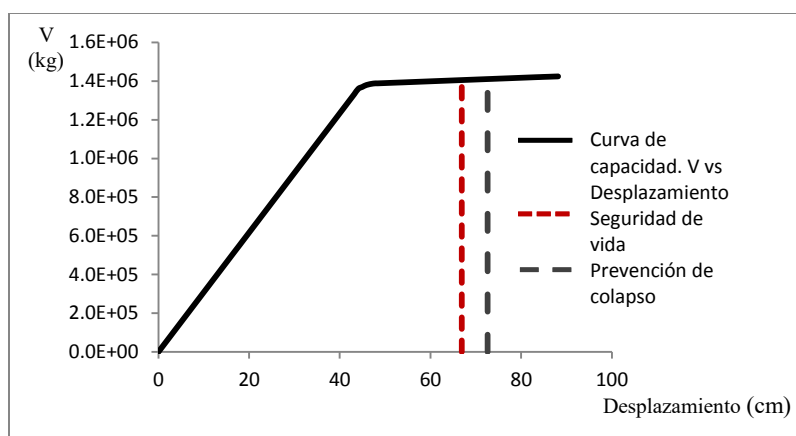


Figura.A.3.14 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M125

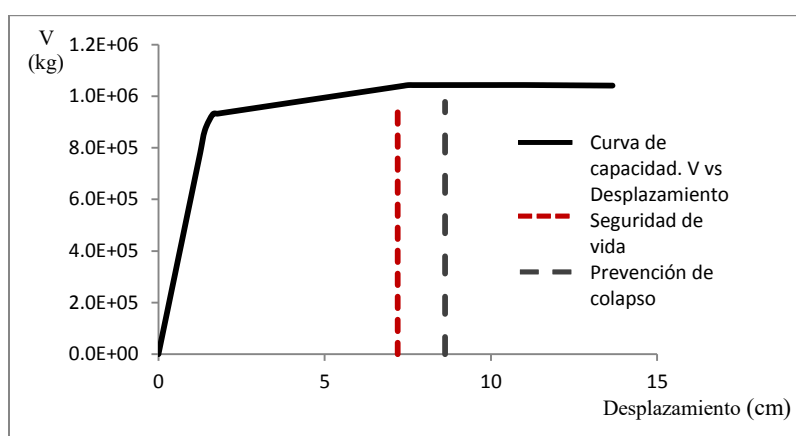


Figura.A.3.15 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M134

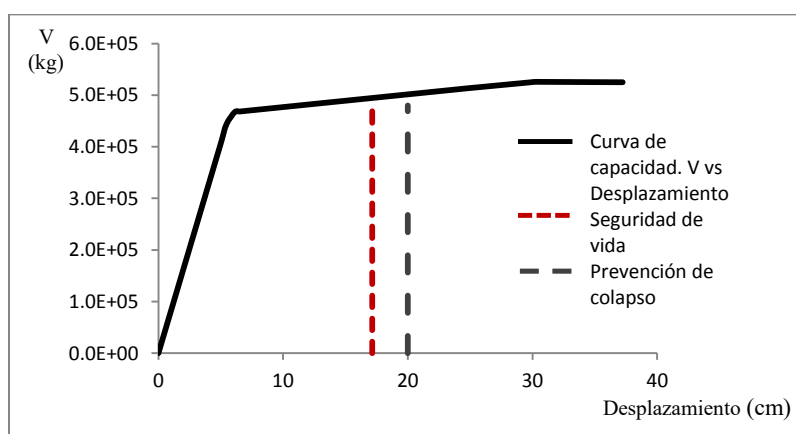


Figura.A.3.16 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M135

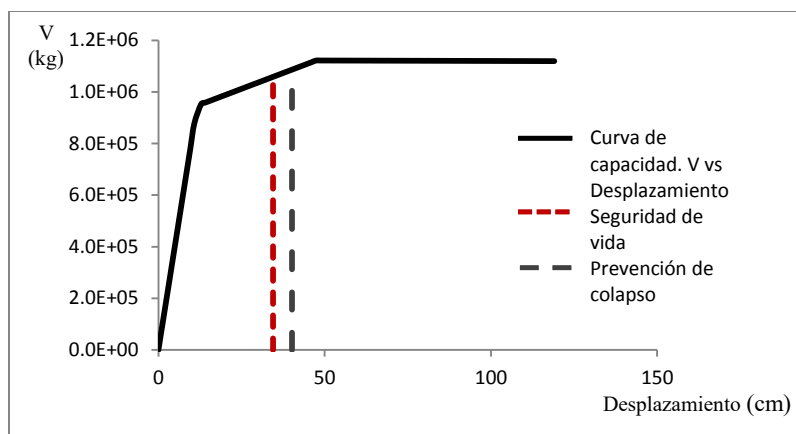


Figura.A.3.17 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M136

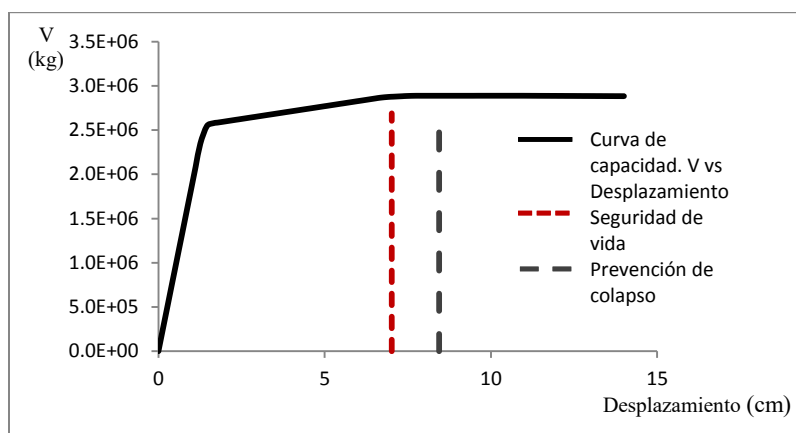


Figura.A.3.18 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M137

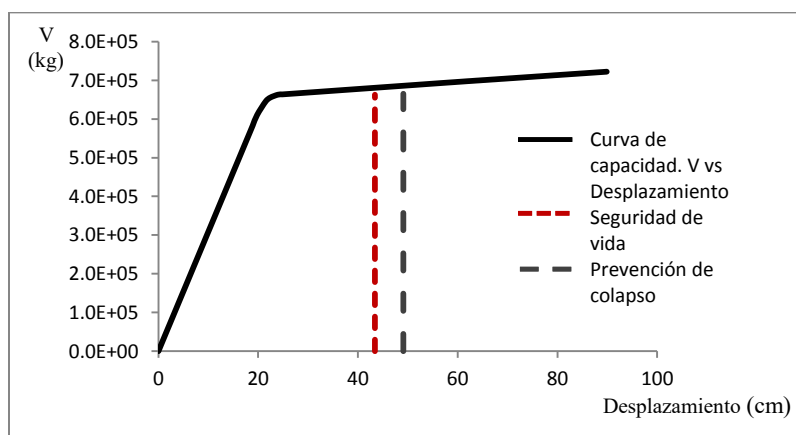


Figura.A.3.19 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M138

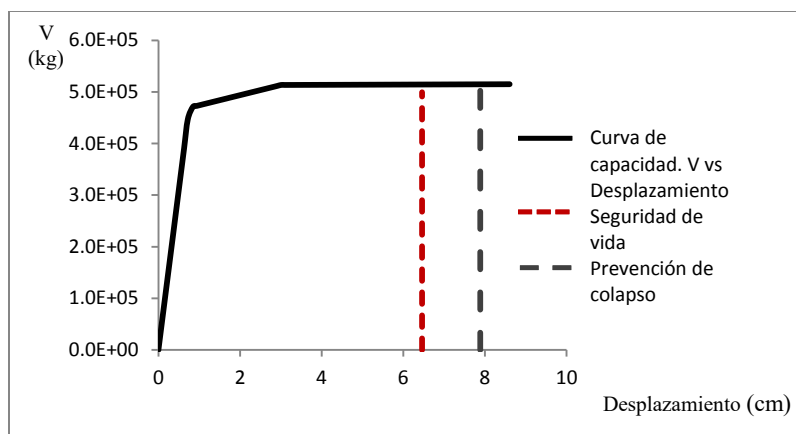


Figura.A.3.20 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M147

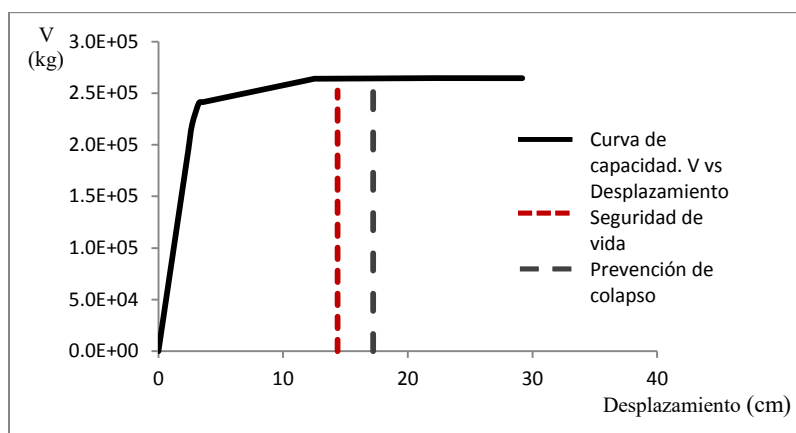


Figura.A.3.21 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M148

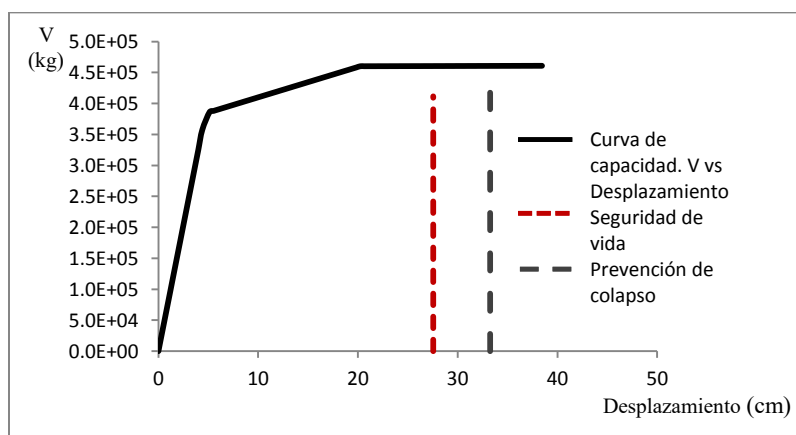


Figura.A.3.22 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M149

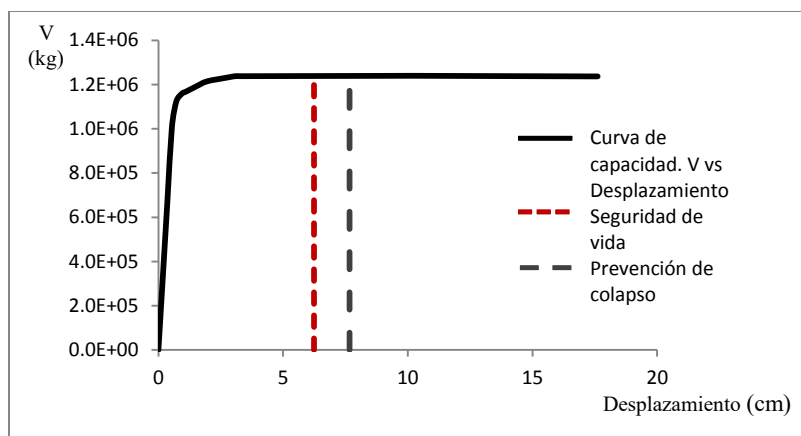


Figura.A.3.23 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M150

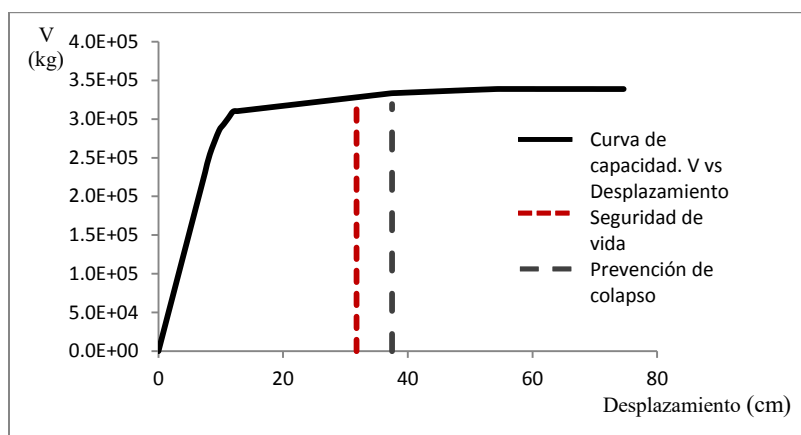


Figura.A.3.24 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M151

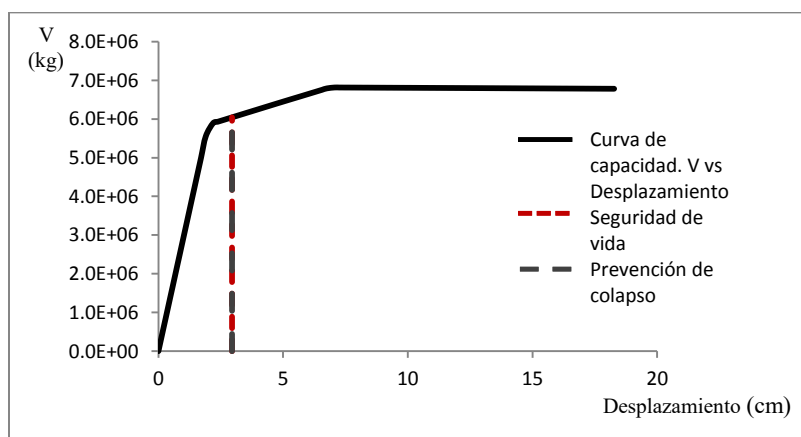


Figura.A.3.25 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M079

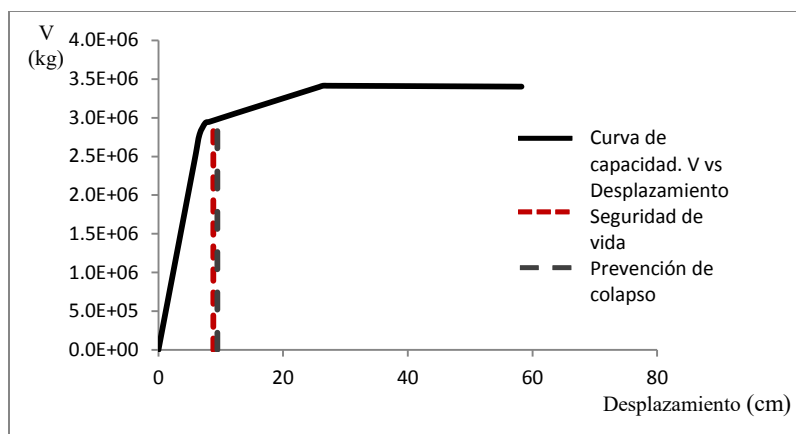


Figura.A.3.26 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M080

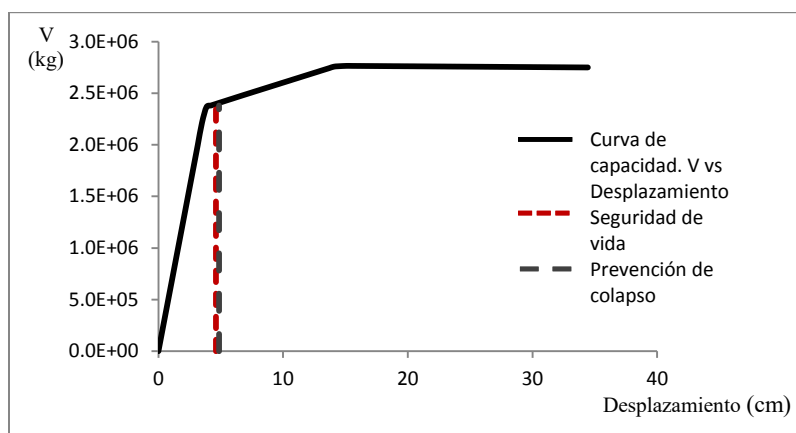


Figura.A.3.27 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M081

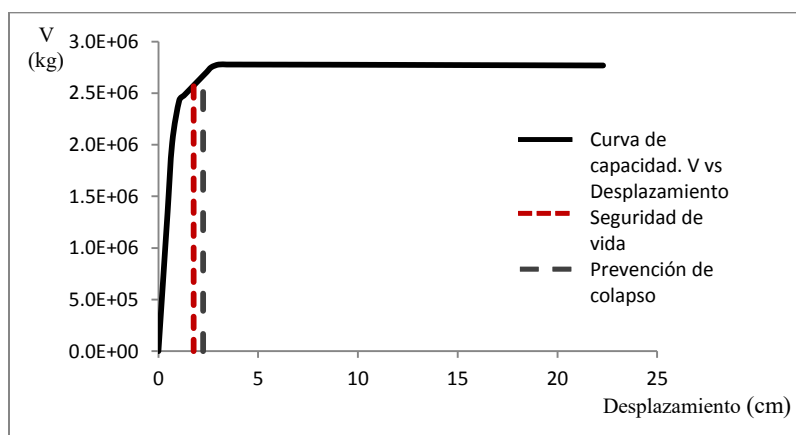


Figura.A.3.28 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M092

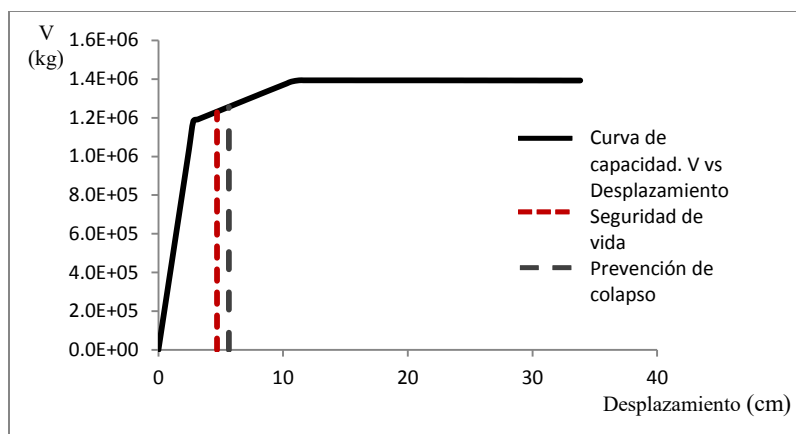


Figura.A.3.29 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M093

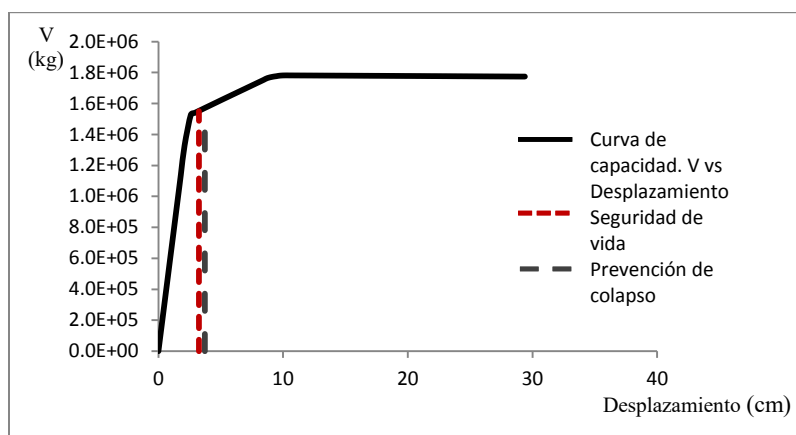


Figura.A.3.30 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M094

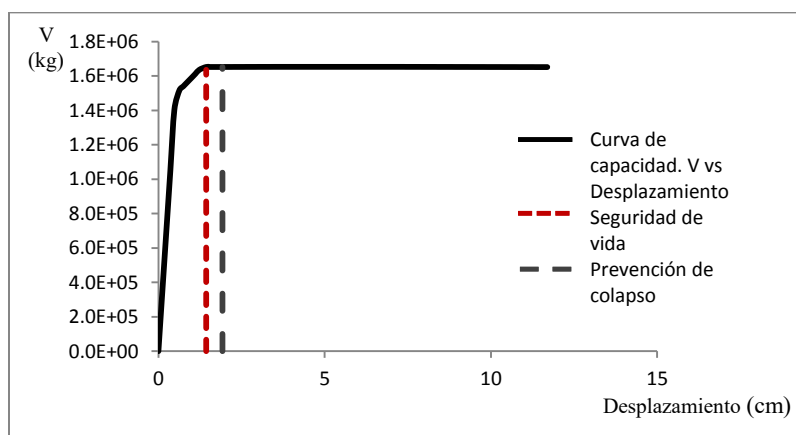


Figura.A.3.31 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M105

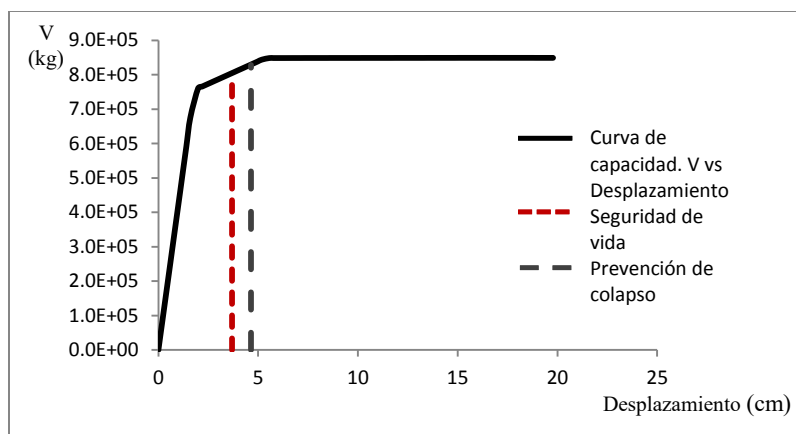


Figura.A.3.32 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M106

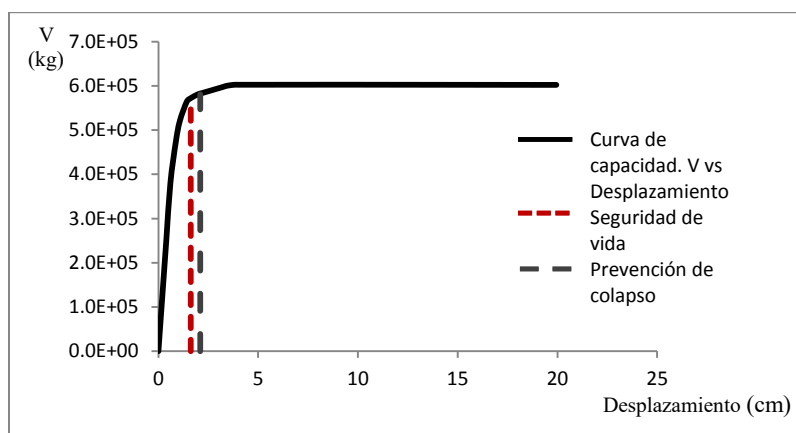


Figura.A.3.33 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M107

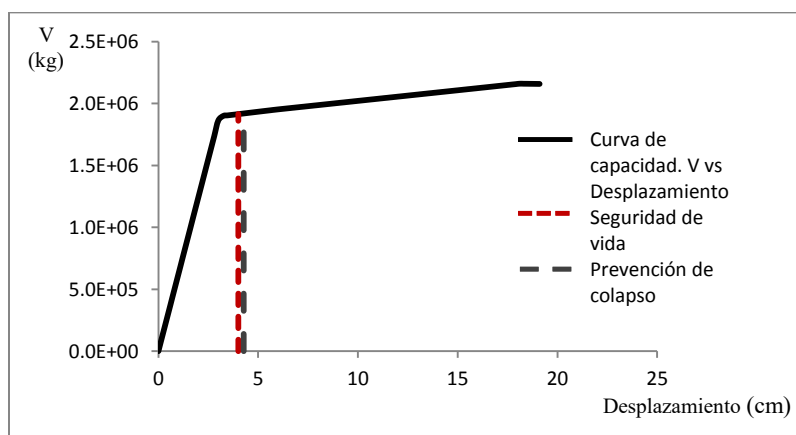


Figura.A.3.34 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M082

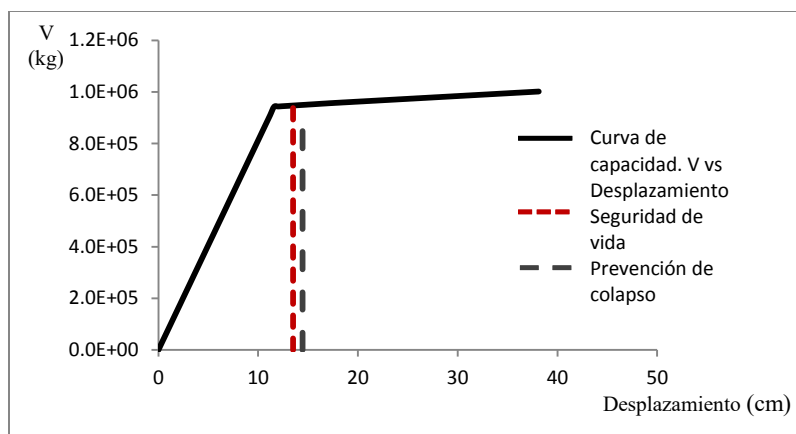


Figura.A.3.35 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M083

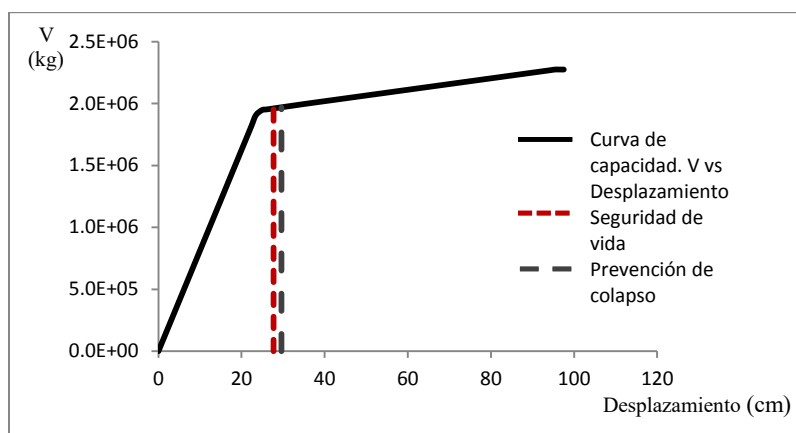


Figura.A.3.36 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M084

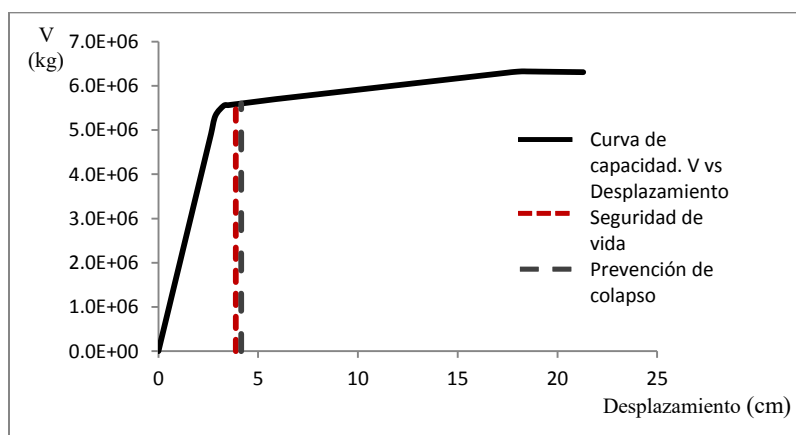


Figura.A.3.37 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M085

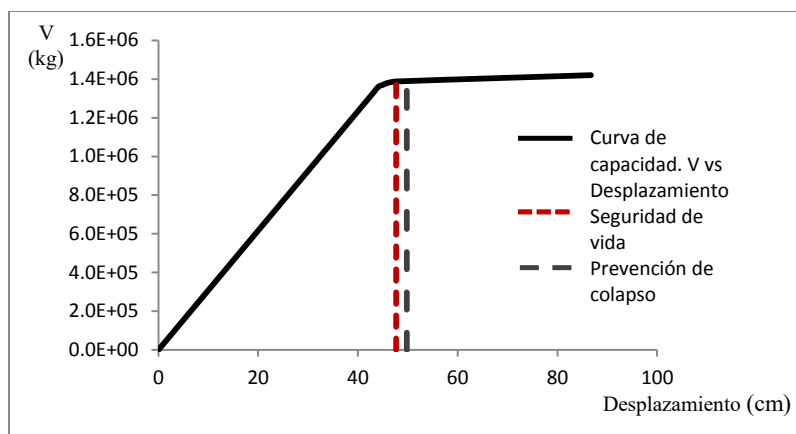


Figura.A.3.38 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M086

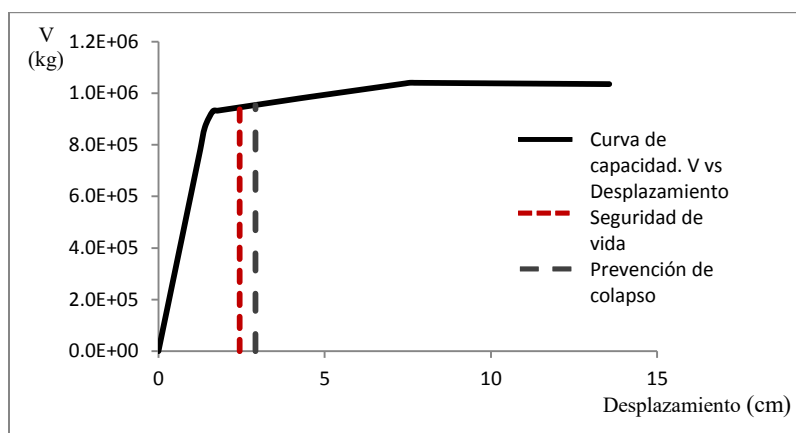


Figura.A.3.39 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M095

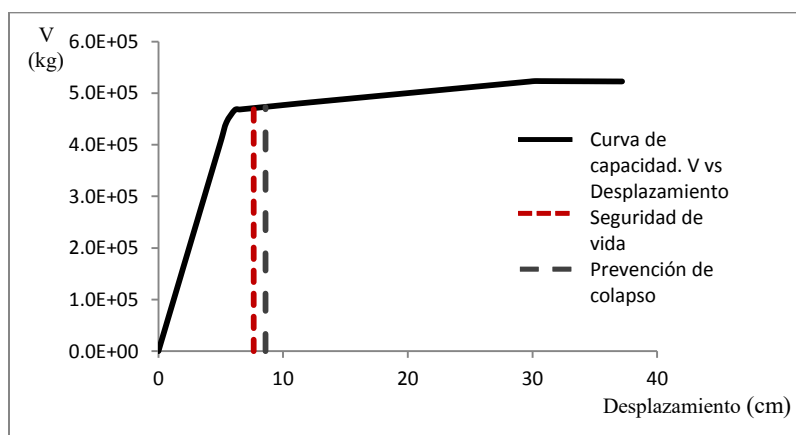


Figura.A.3.40 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M096

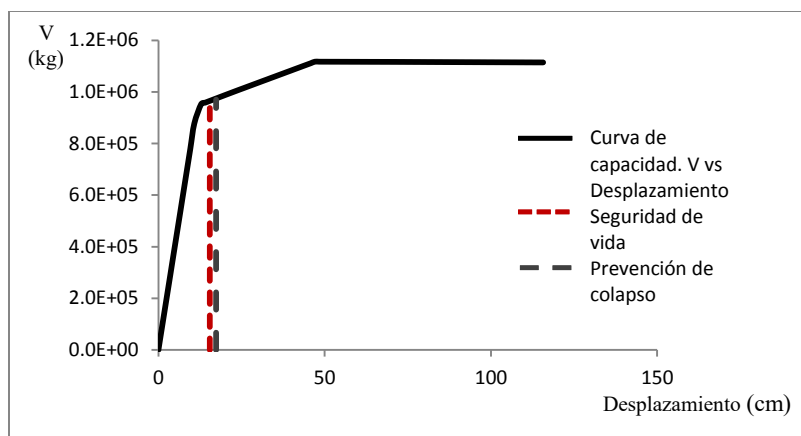


Figura.A.3.41 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M097

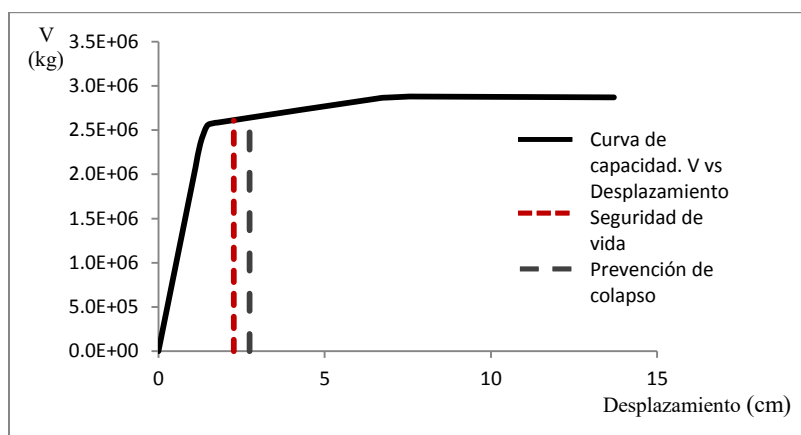


Figura.A.3.42 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M098

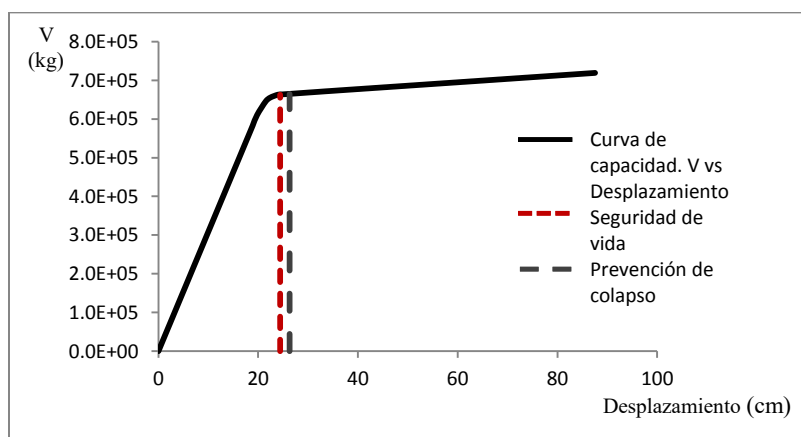


Figura.A.3.43 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M099

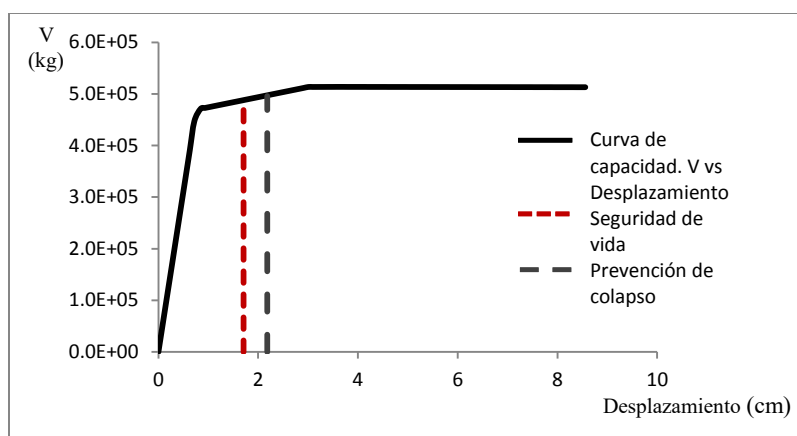


Figura.A.3.44 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M108

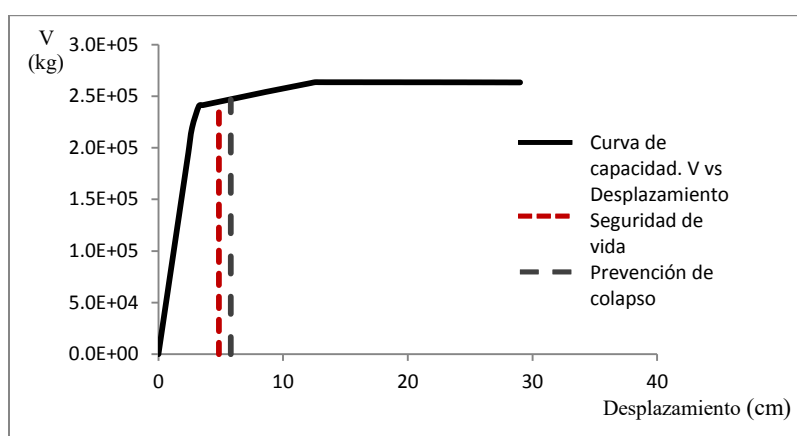


Figura.A.3.45 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M109

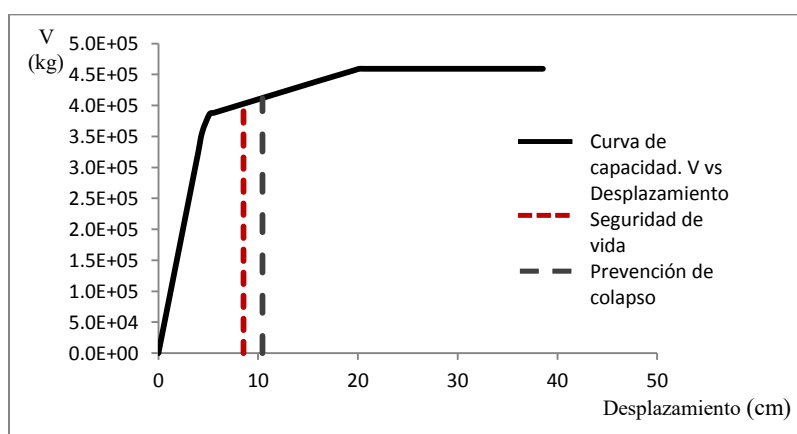


Figura.A.3.46 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M110

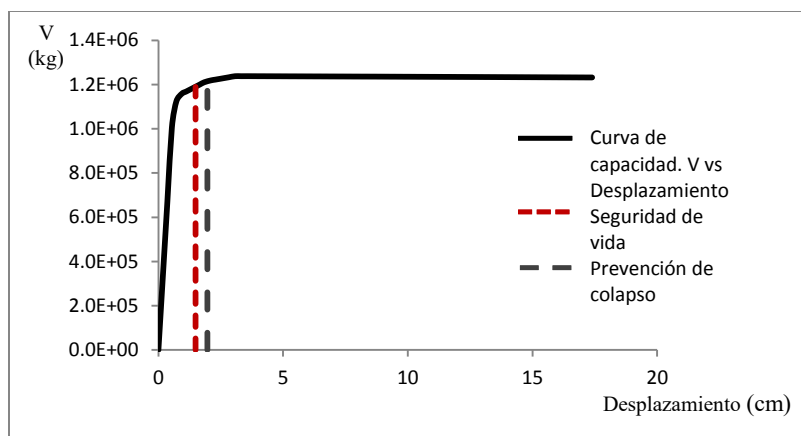


Figura.A.3.47 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M111

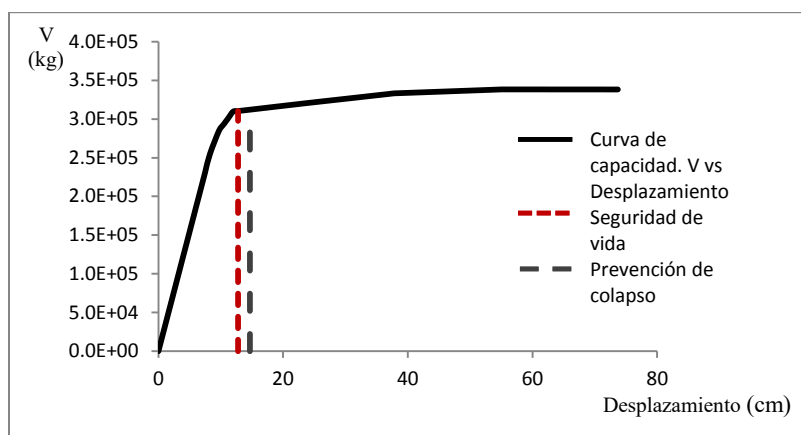


Figura.A.3.48 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M112

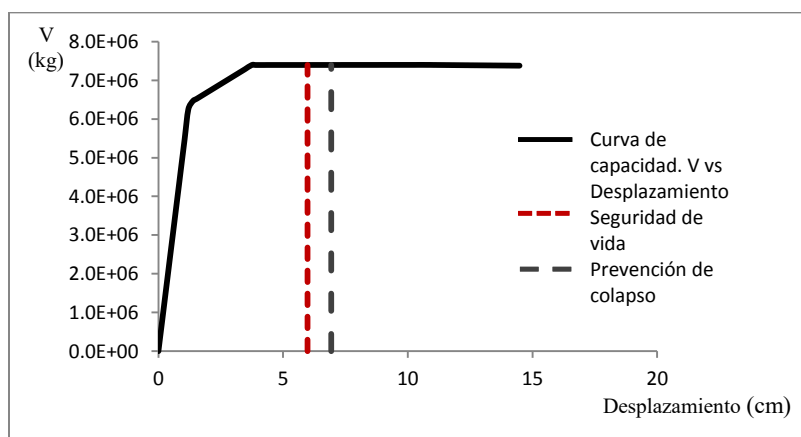


Figura.A.3.49 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M040

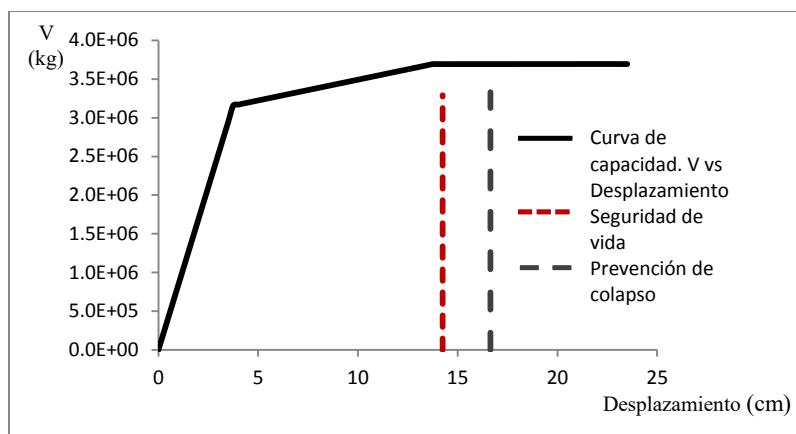


Figura.A.3.50 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M041

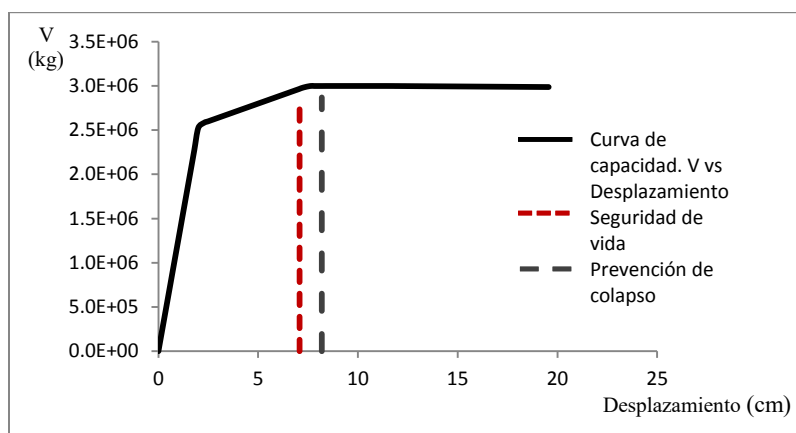


Figura.A.3.51 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M042

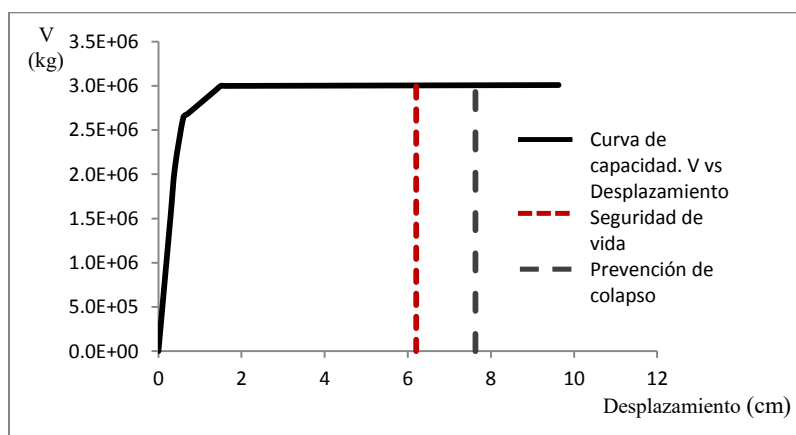


Figura.A.3.52 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M053

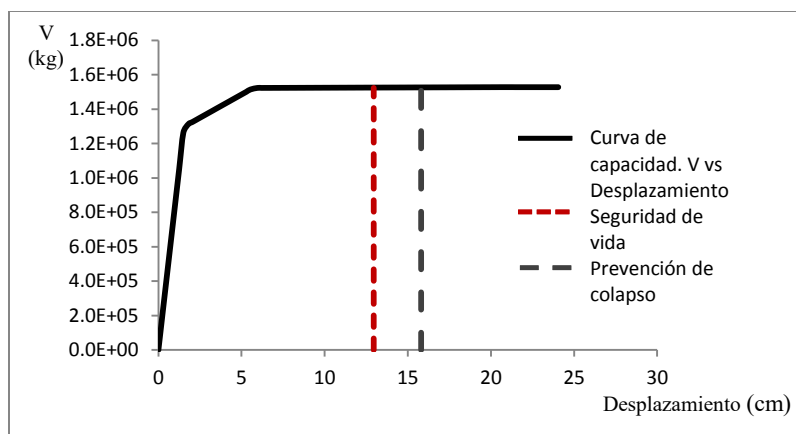


Figura.A.3.53 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M054

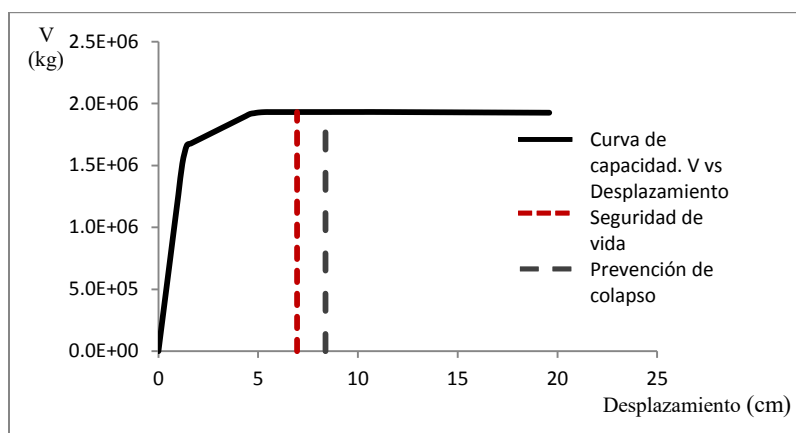


Figura.A.3.54 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M055

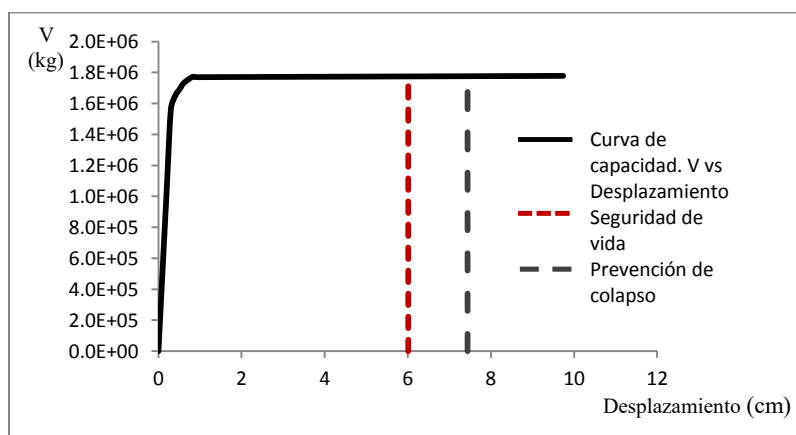


Figura.A.3.55 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M066

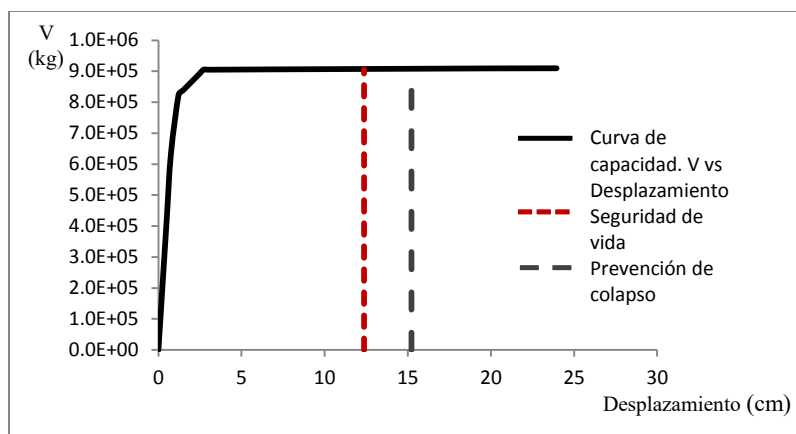


Figura.A.3.56 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M067

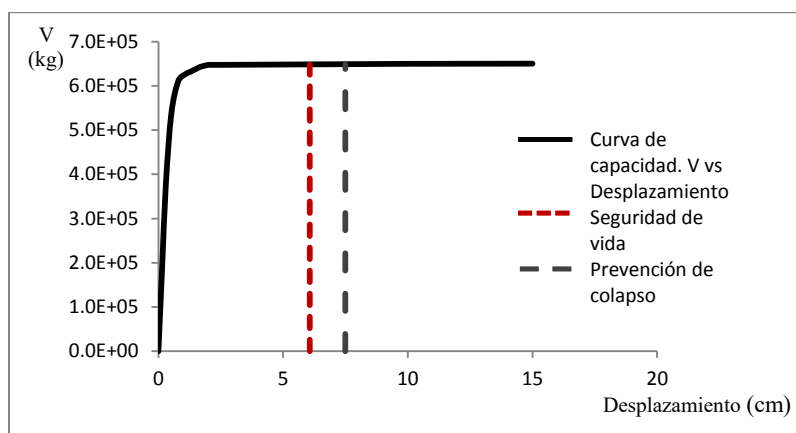


Figura.A.3.57 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M068

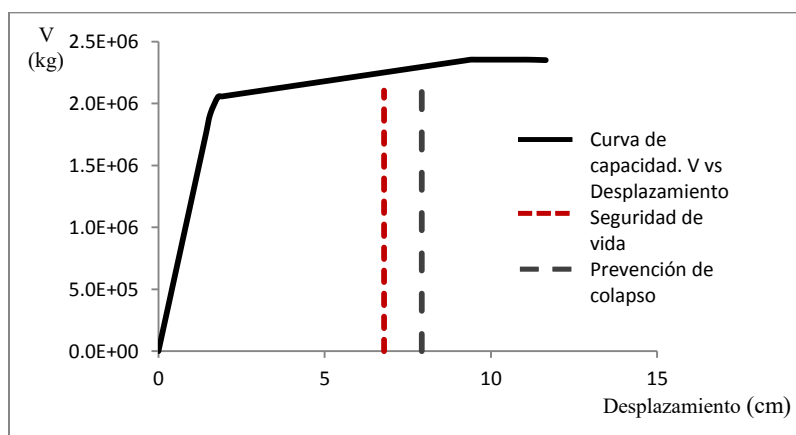


Figura.A.3.58 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M043

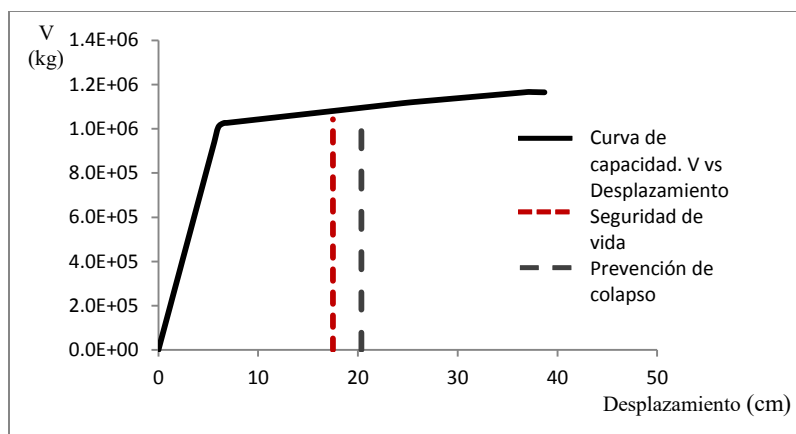


Figura.A.3.59 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M044

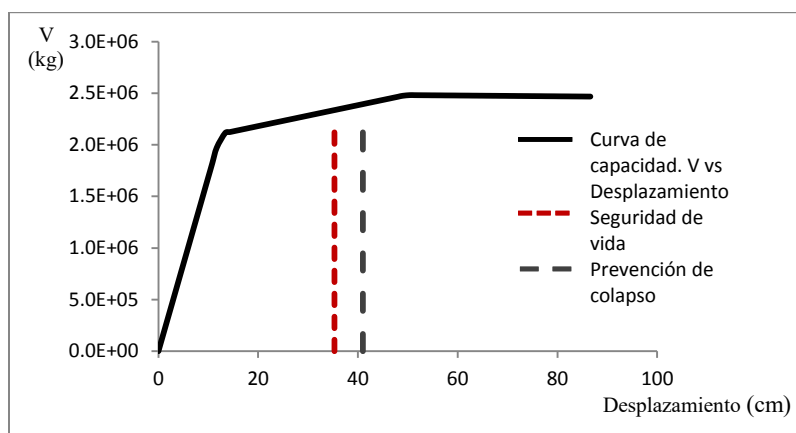


Figura.A.3.60 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M045

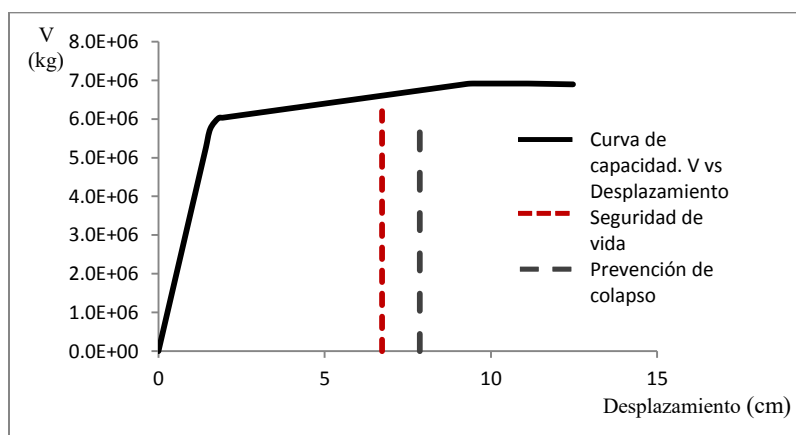


Figura.A.3.61 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M046

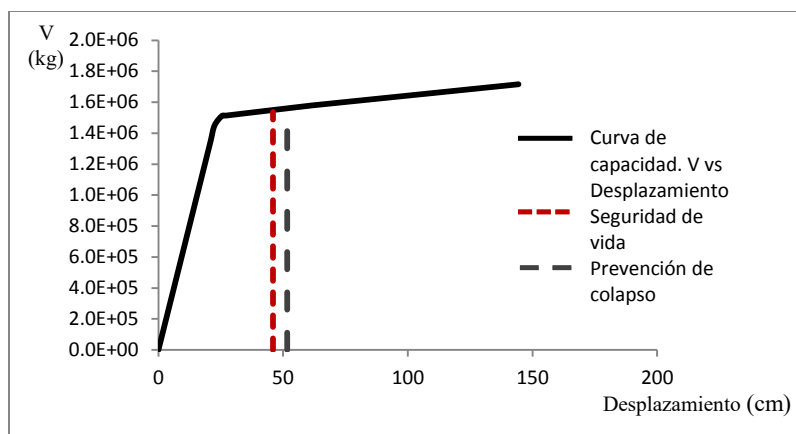


Figura.A.3.62 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M047

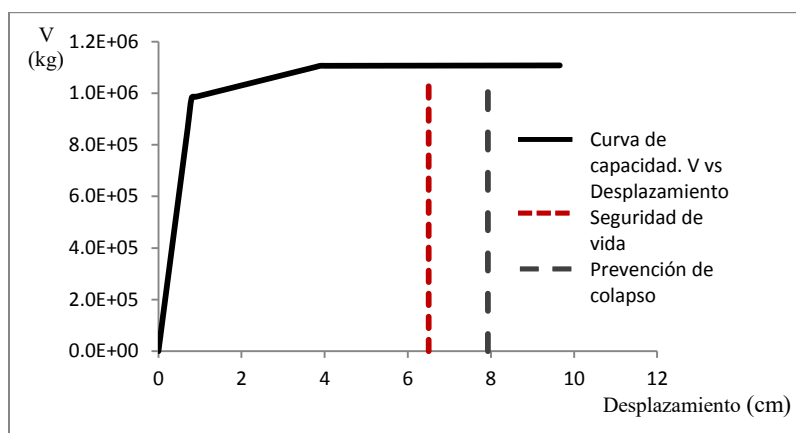


Figura.A.3.63 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M056

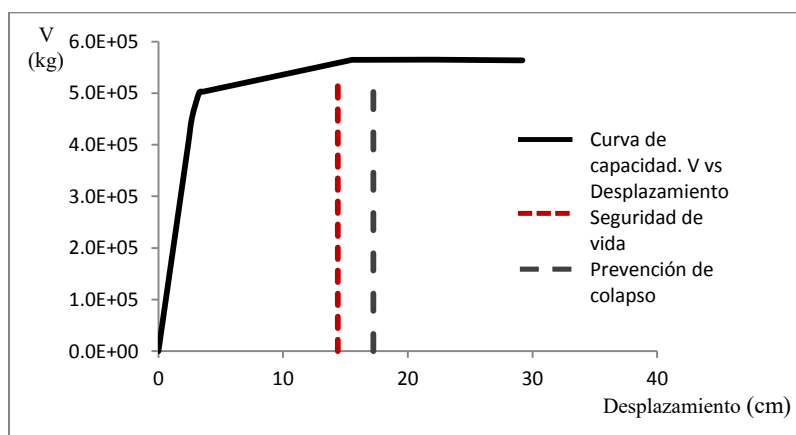


Figura.A.3.64 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M057

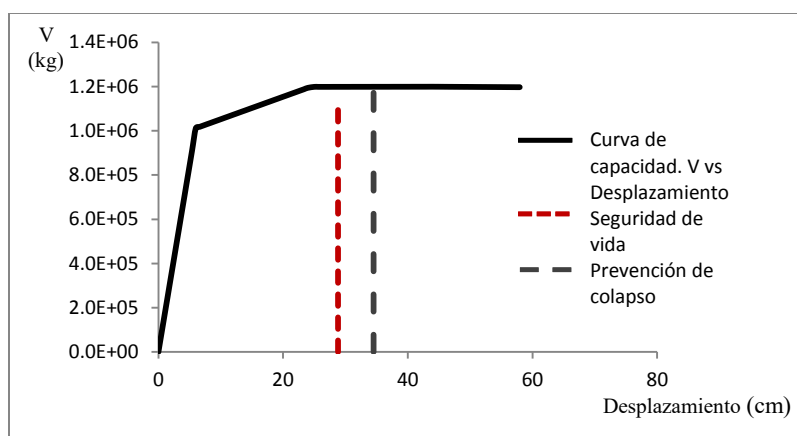


Figura.A.3.65 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M058

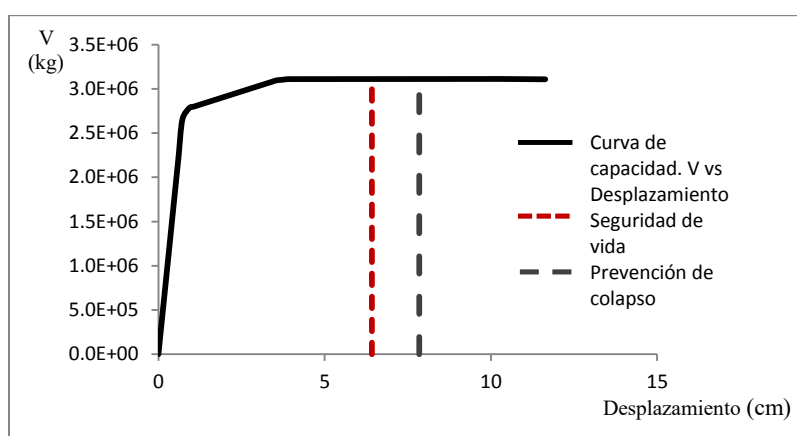


Figura.A.3.66 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M059

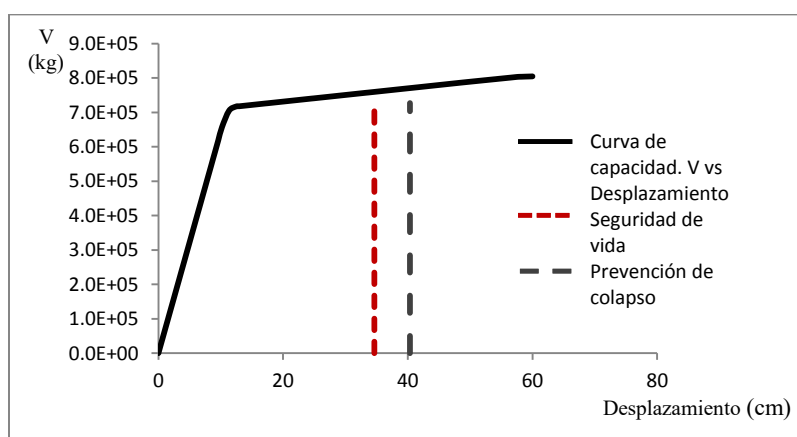


Figura.A.3.67 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M060

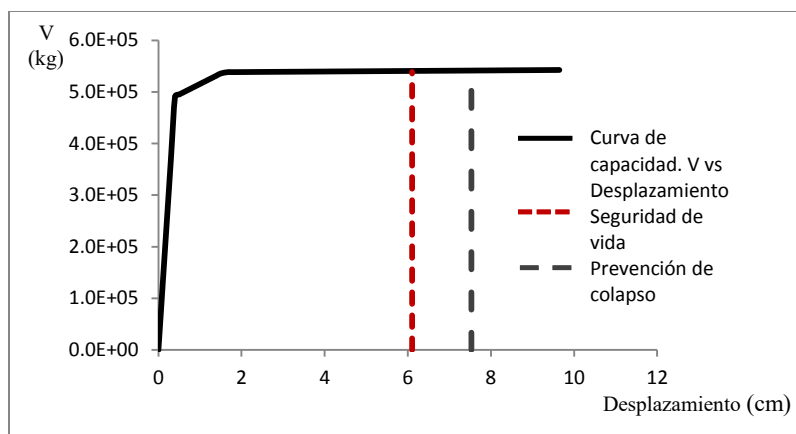


Figura.A.3.68 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M069

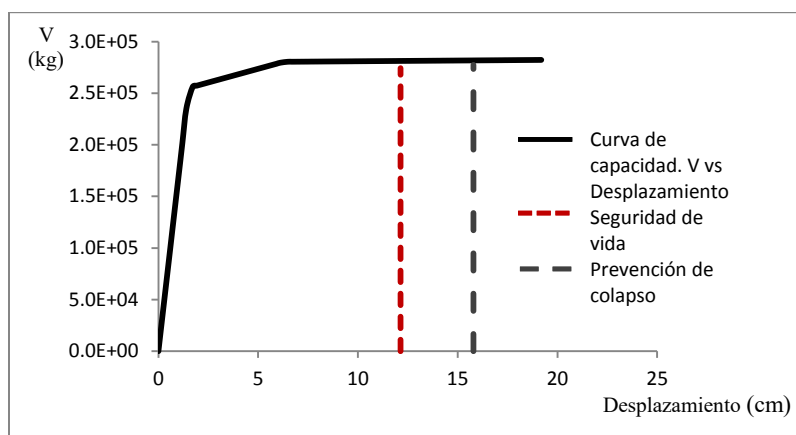


Figura.A.3.69 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M070

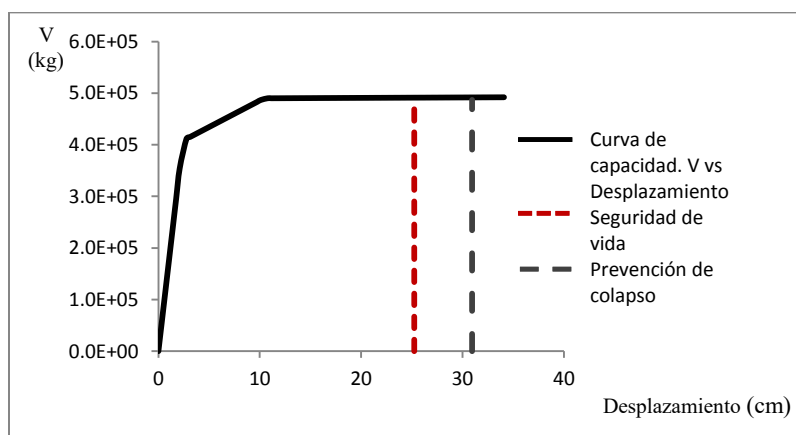


Figura.A.3.70 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M071

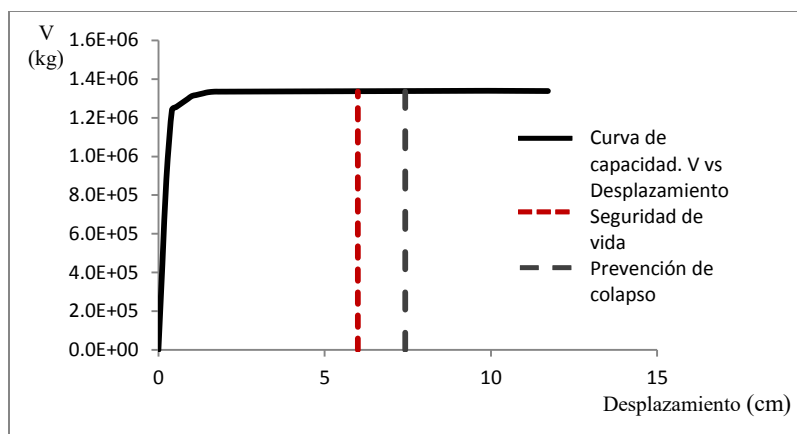


Figura.A.3.71 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M072

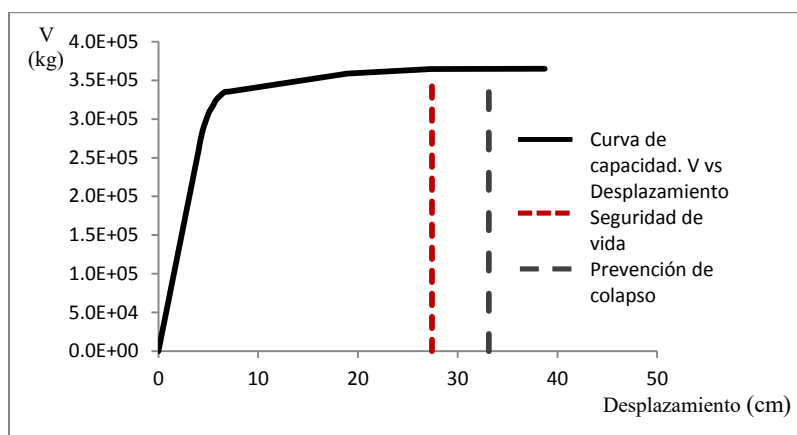


Figura.A.3.72 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M073

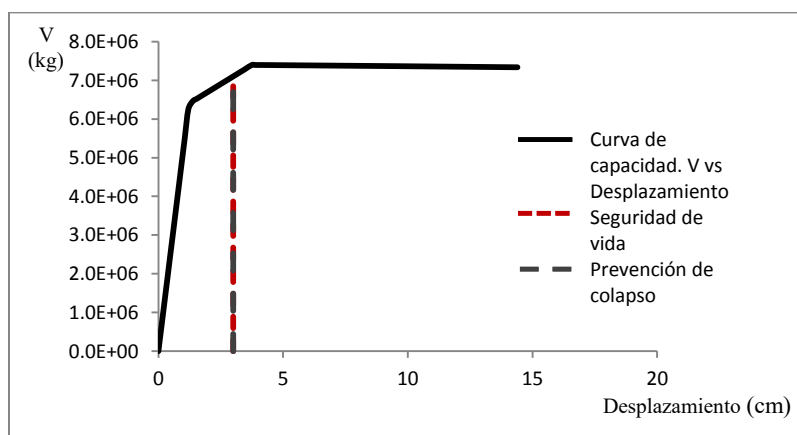


Figura.A.3.73 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M001

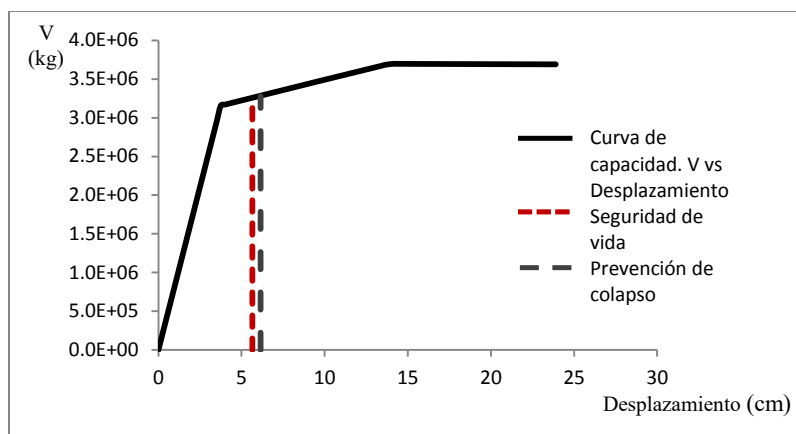


Figura.A.3.74 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M002

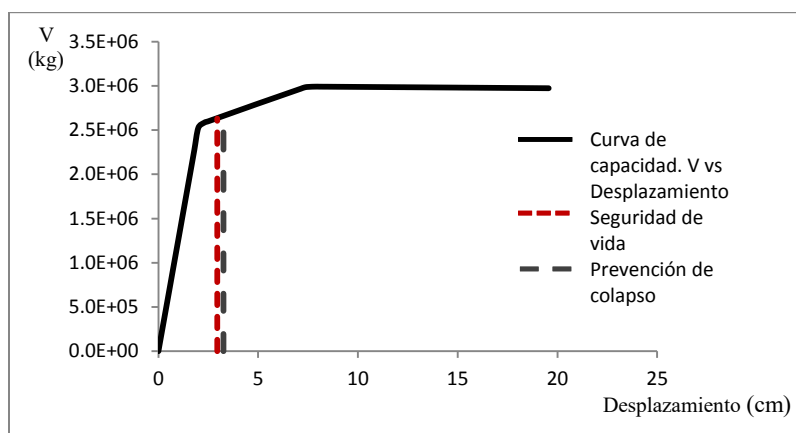


Figura.A.3.75 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M003

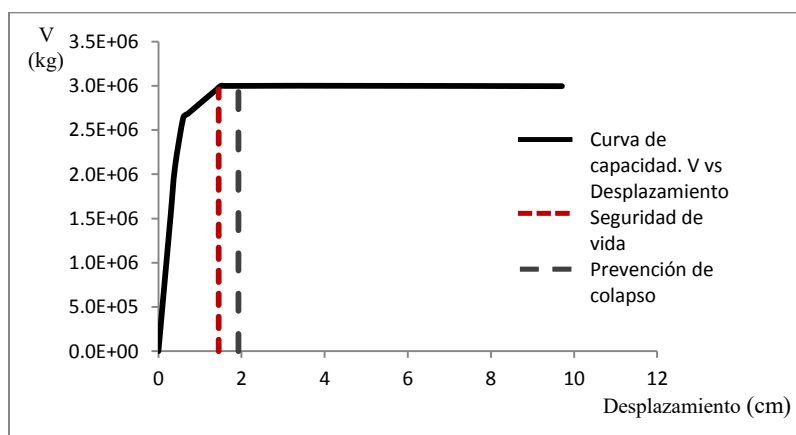


Figura.A.3.76 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M014

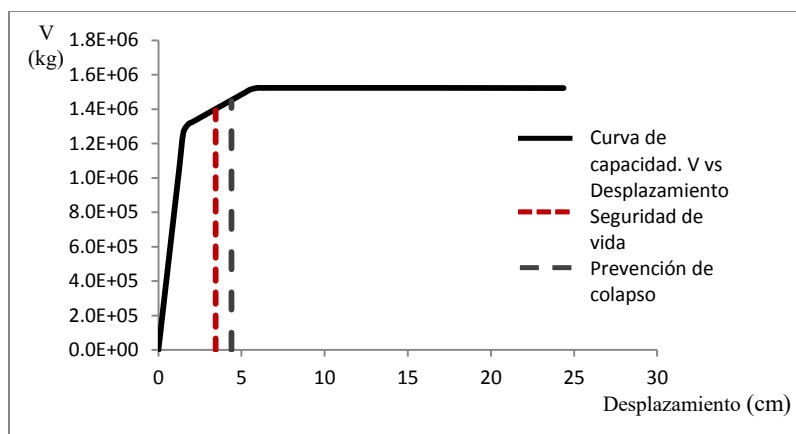


Figura.A.3.77 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M015

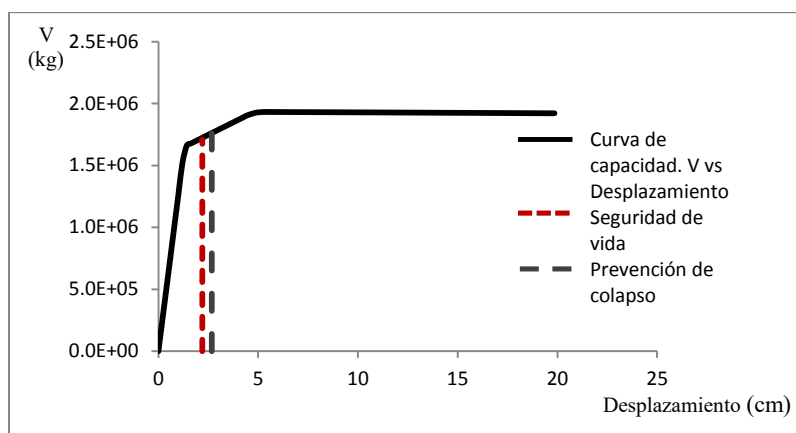


Figura.A.3.78 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M016

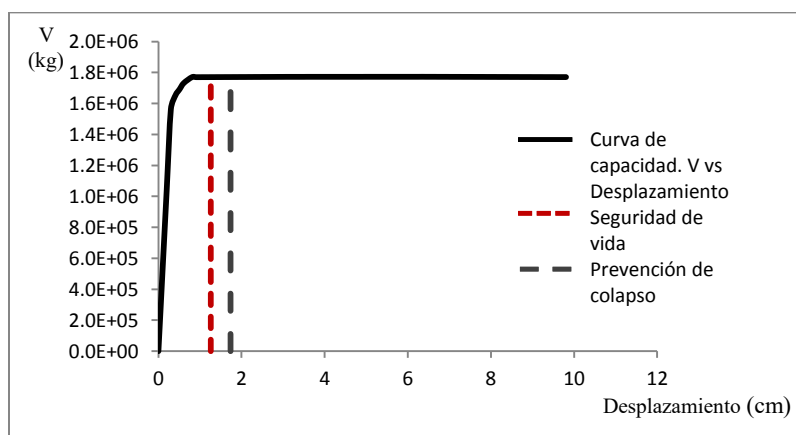


Figura.A.3.79 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M027

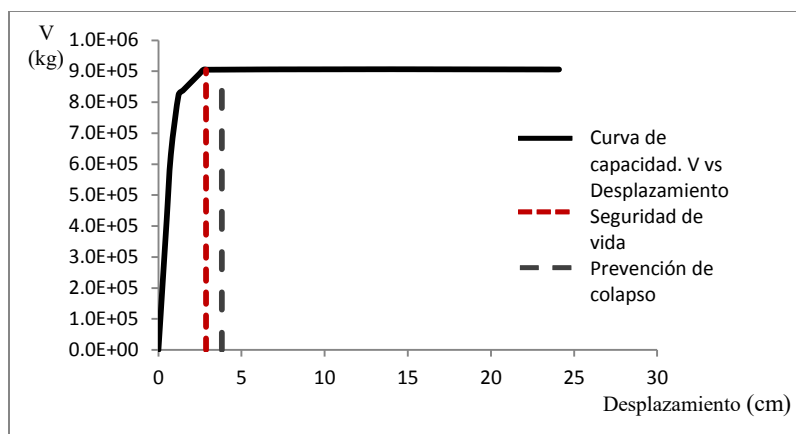


Figura.A.3.80 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M028

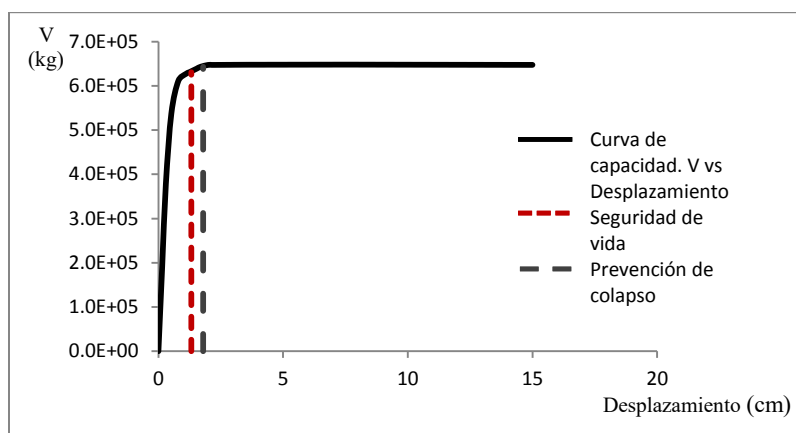


Figura.A.3.81 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M029

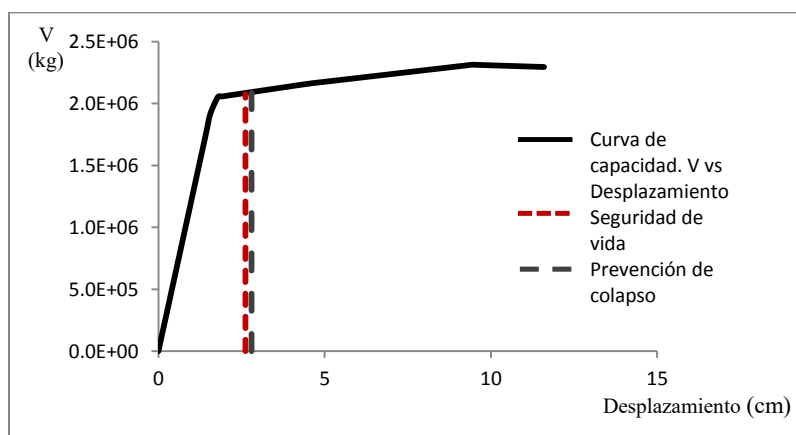


Figura.A.3.82 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M004

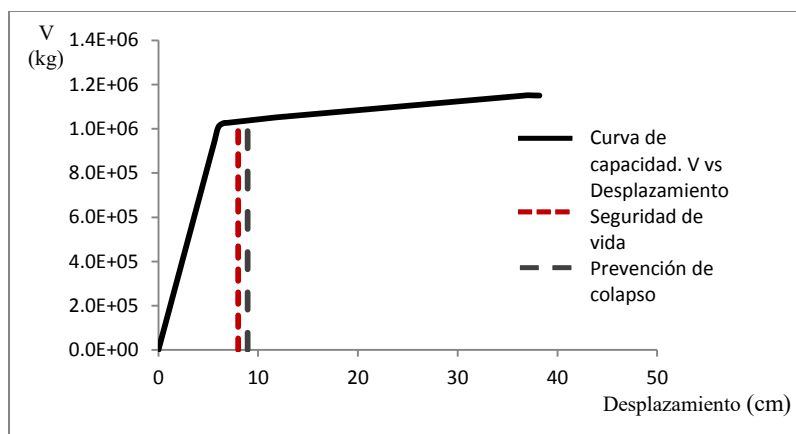


Figura.A.3.83 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M005

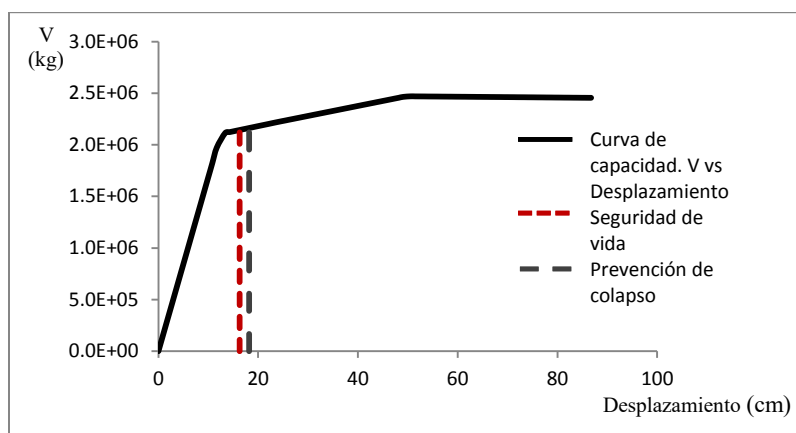


Figura.A.3.84 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M006

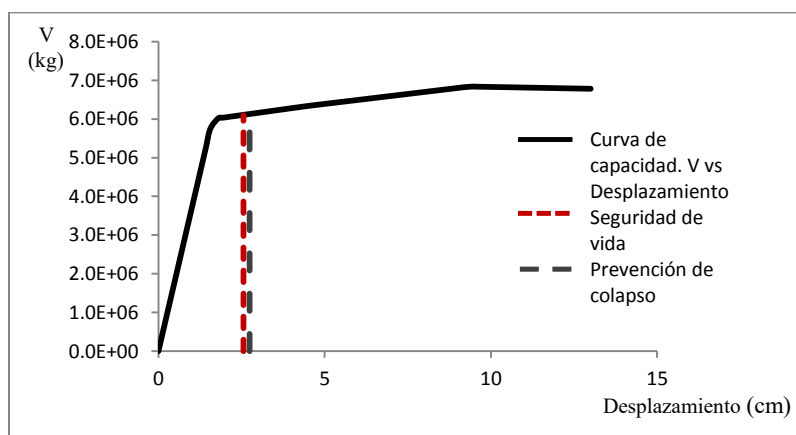


Figura.A.3.85 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M007

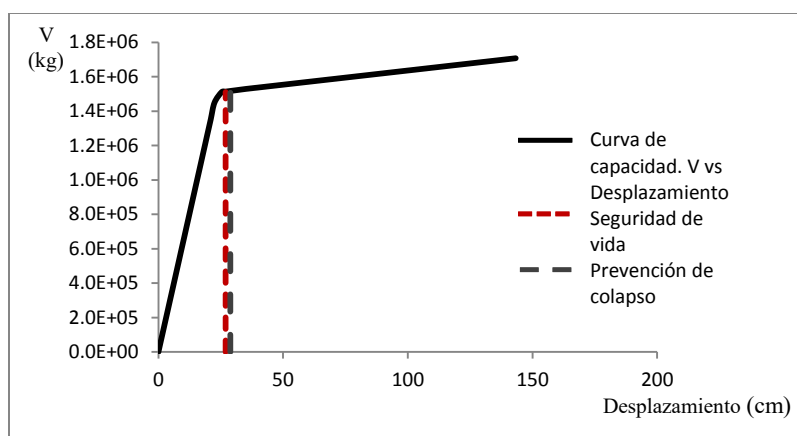


Figura.A.3.86 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M008

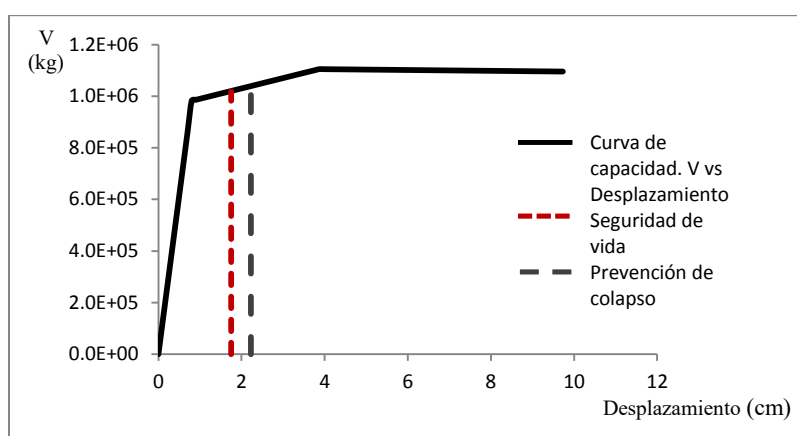


Figura.A.3.87 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M017

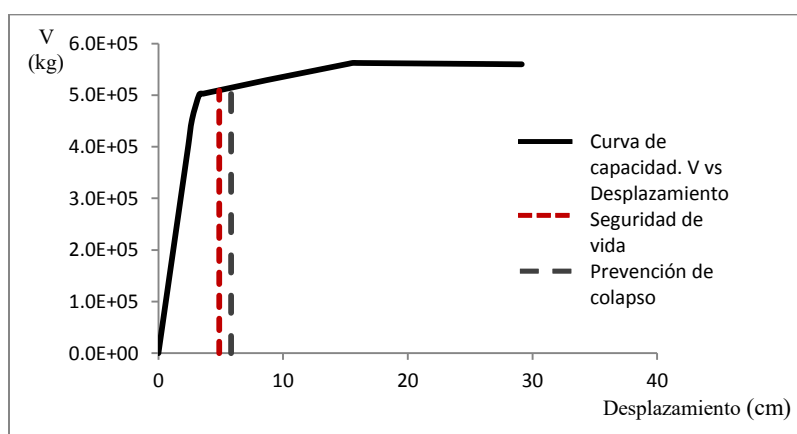


Figura.A.3.88 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M018

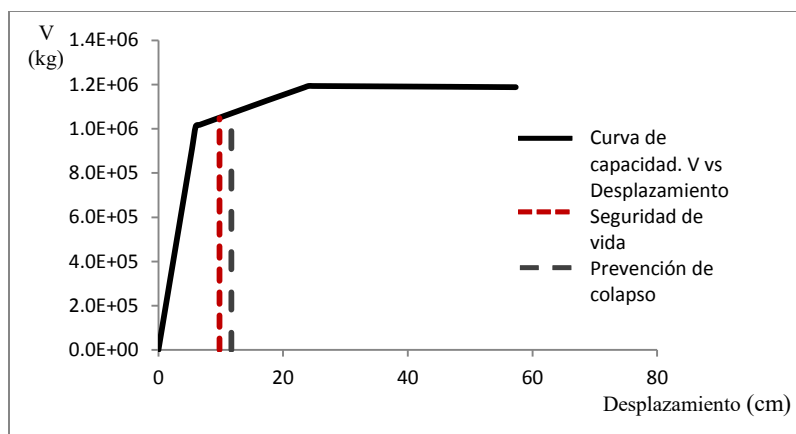


Figura.A.3.89 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M019

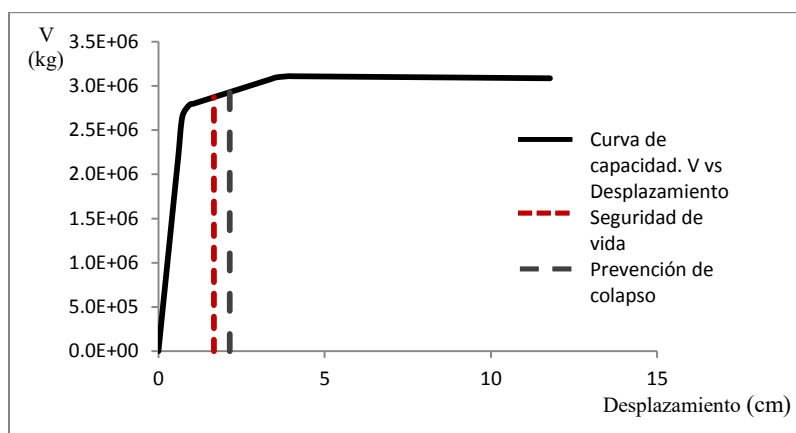


Figura.A.3.90 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M020

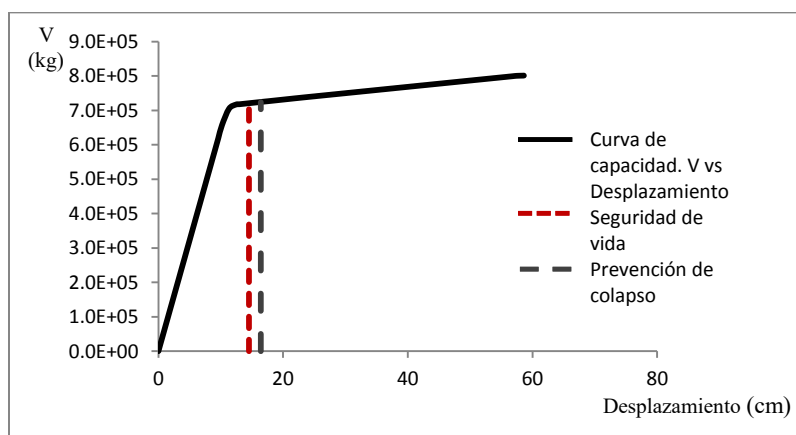


Figura.A.3.91 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M021

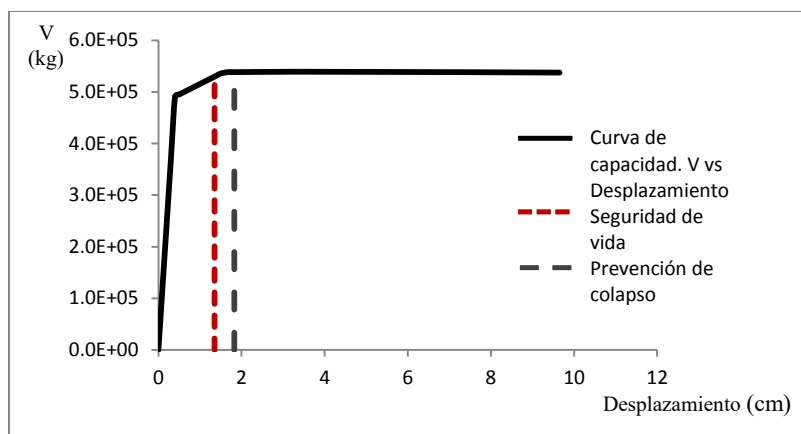


Figura.A.3.92 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M030

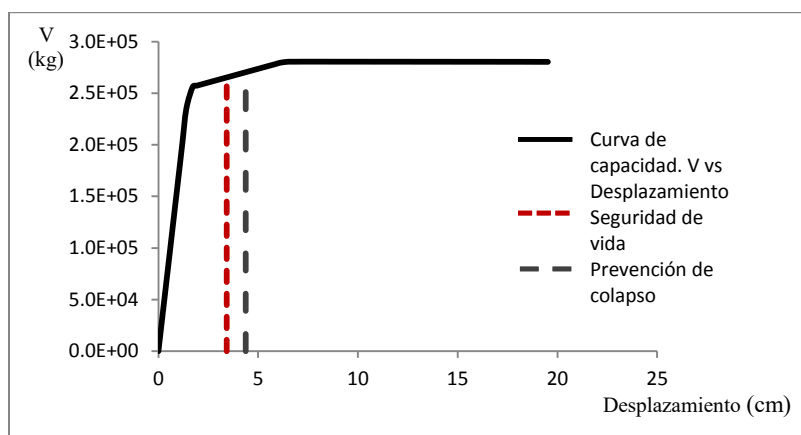


Figura.A.3.93 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M031

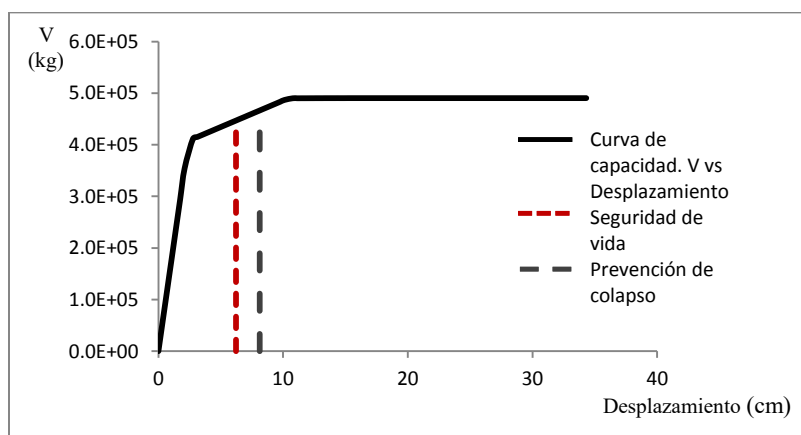


Figura.A.3.94 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M032

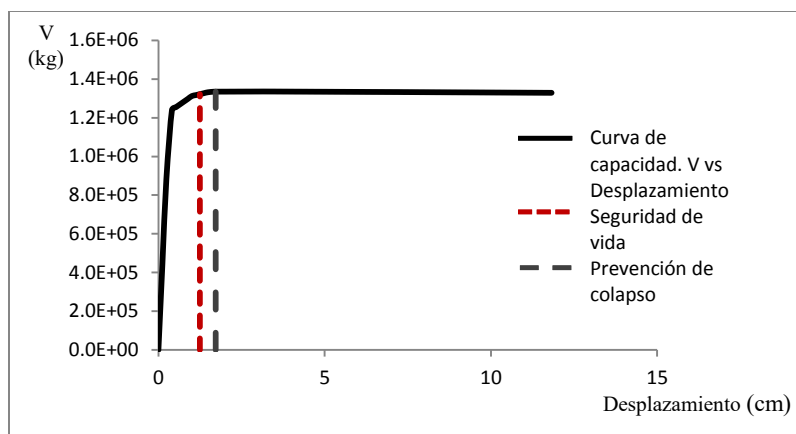


Figura.A.3.95 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M033

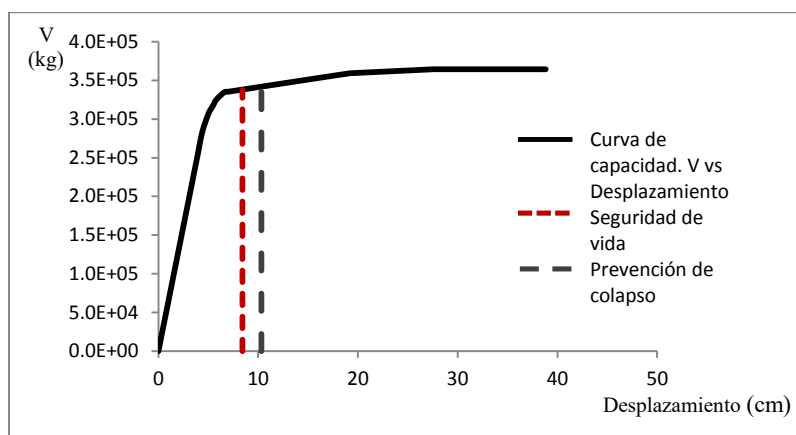


Figura.A.3.96 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M034

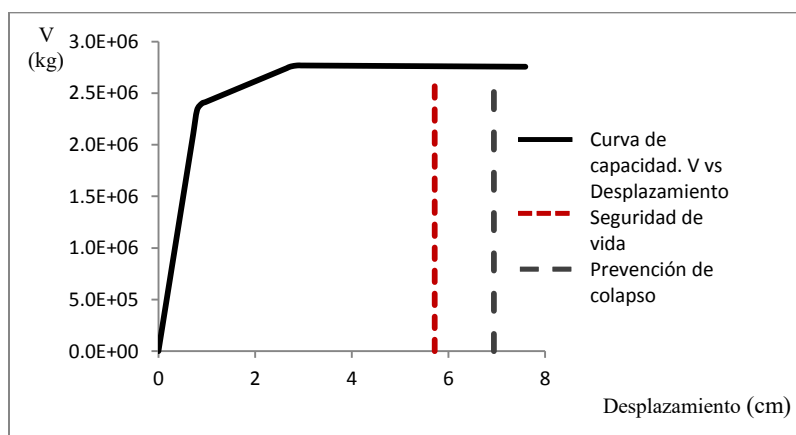


Figura.A.3.97 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M157

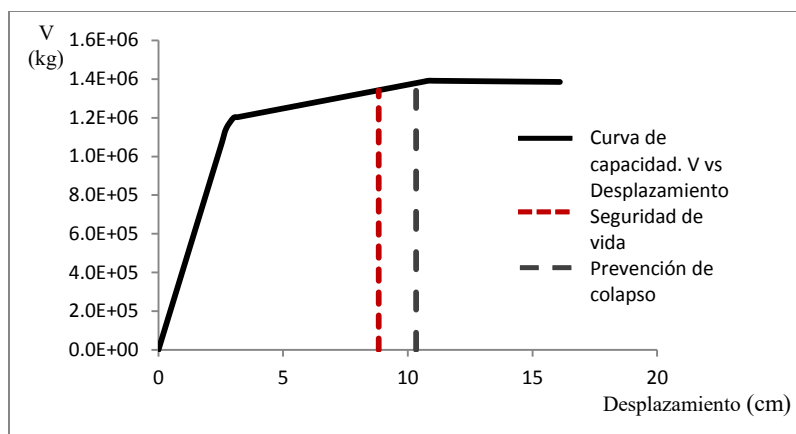


Figura.A.3.98 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M158

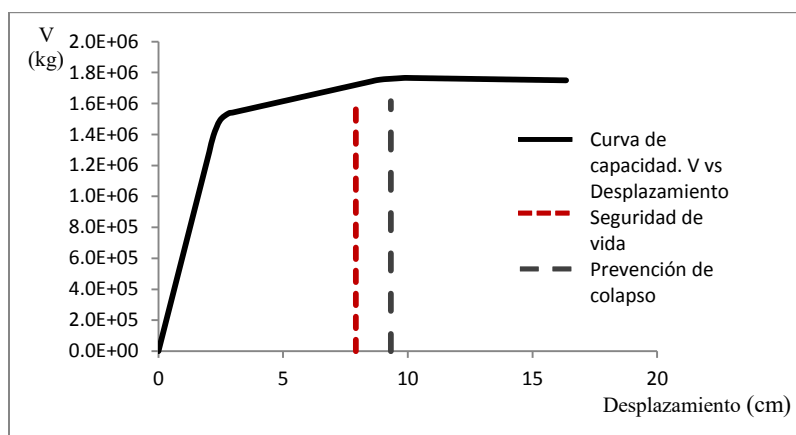


Figura.A.3.99 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M159

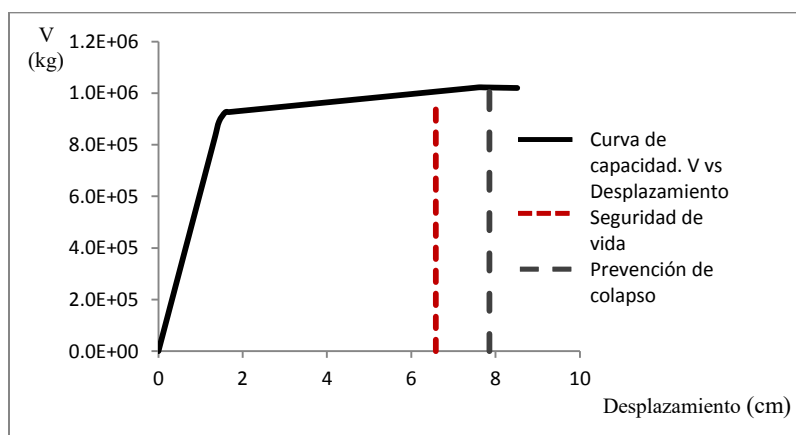


Figura.A.3.100 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M160

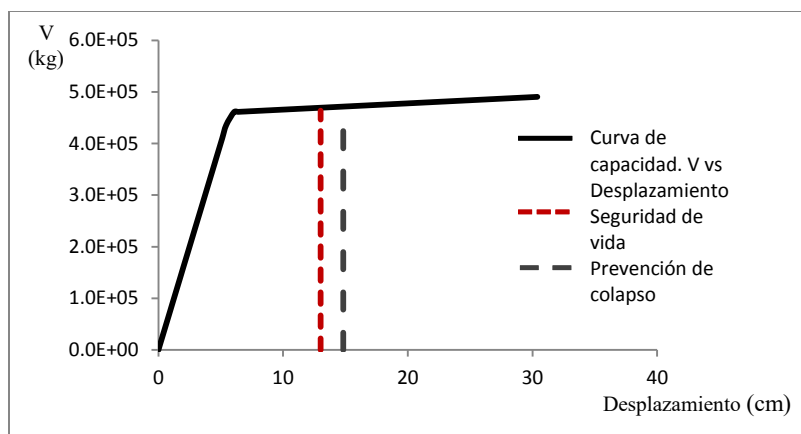


Figura.A.3.101 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M161

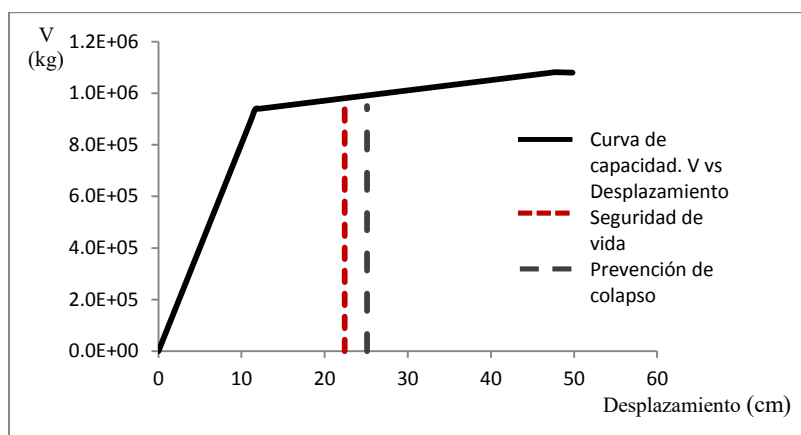


Figura.A.3.102 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M162

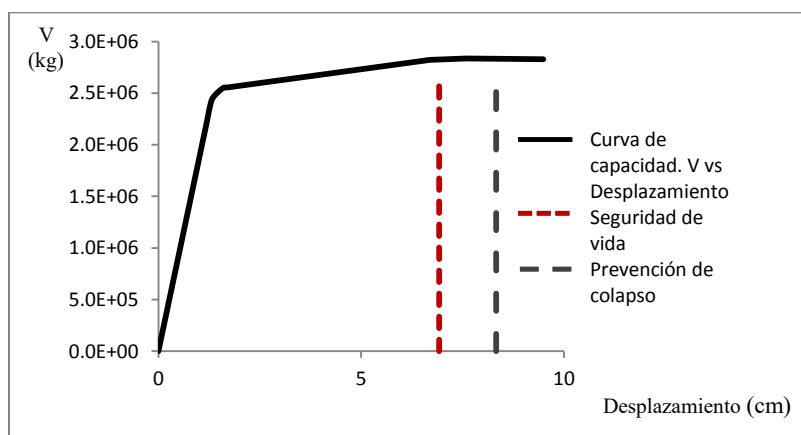


Figura.A.3.103 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M163

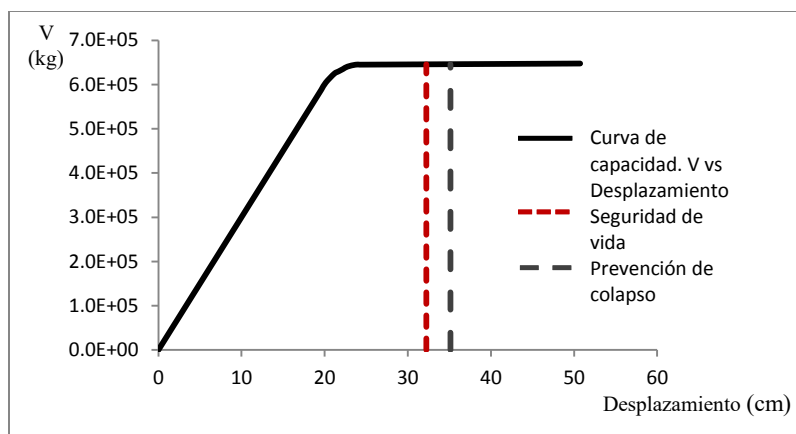


Figura.A.3.104 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M164

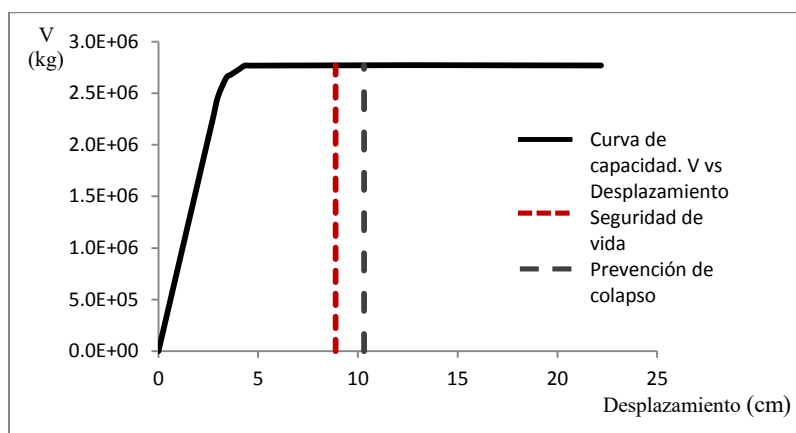


Figura.A.3.105 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M170

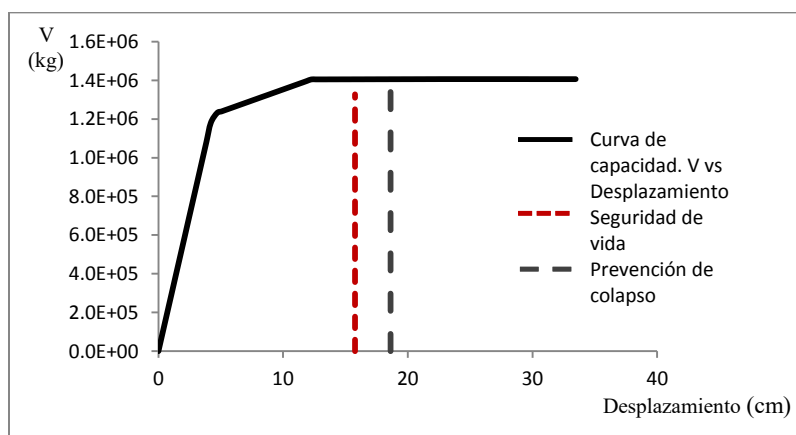


Figura.A.3.106 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M171

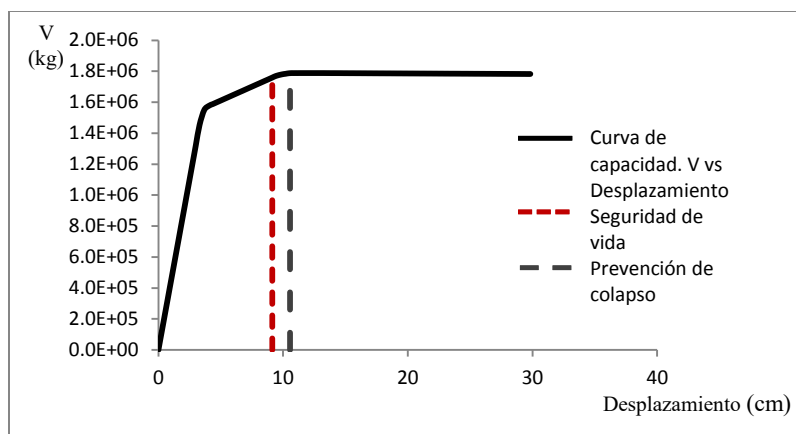


Figura.A.3.107 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M172

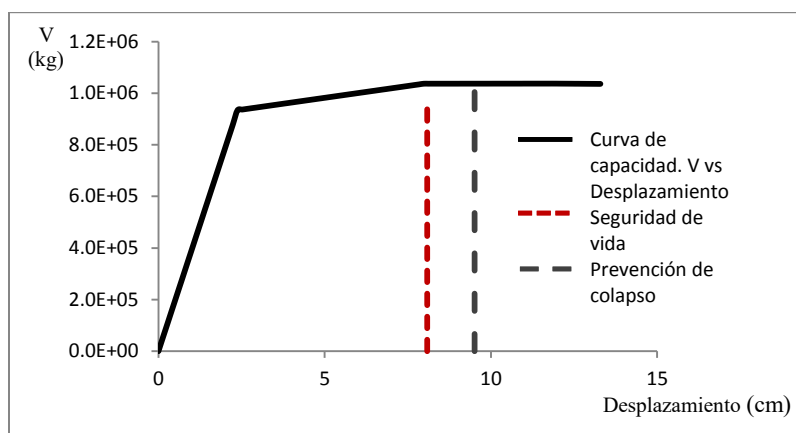


Figura.A.3.108 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M173

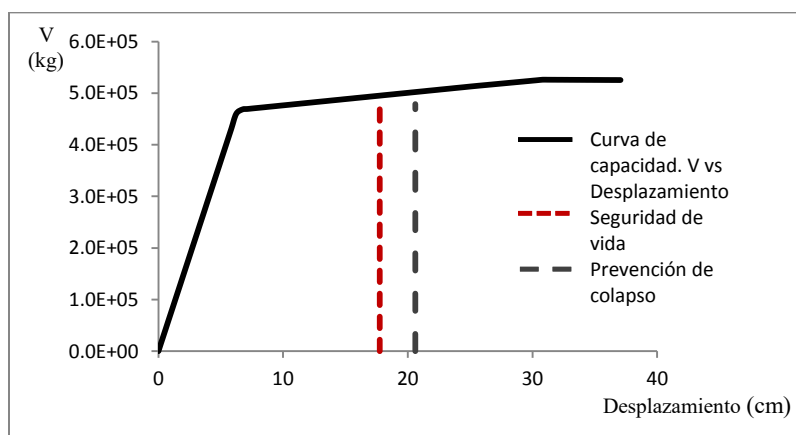


Figura.A.3.109 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M174

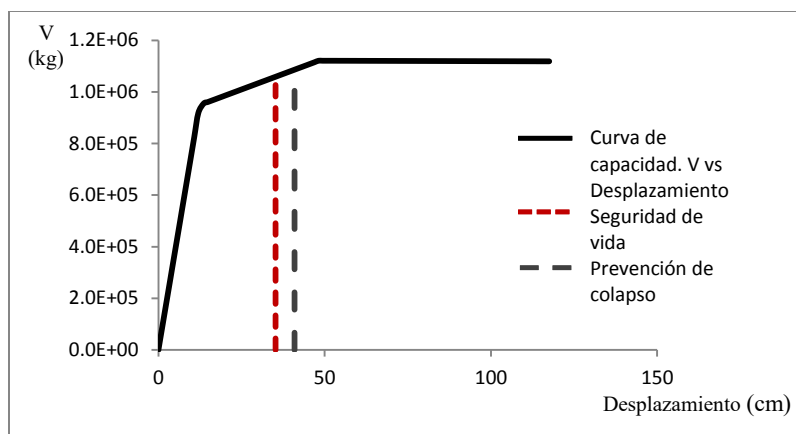


Figura.A.3.110 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M175

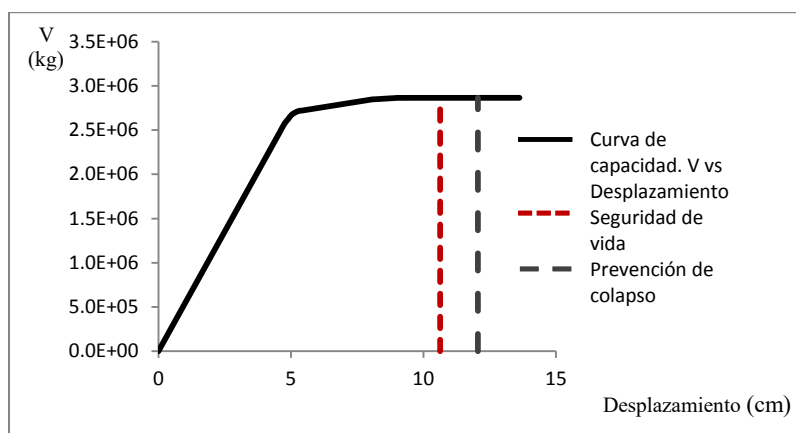


Figura.A.3.111 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M176

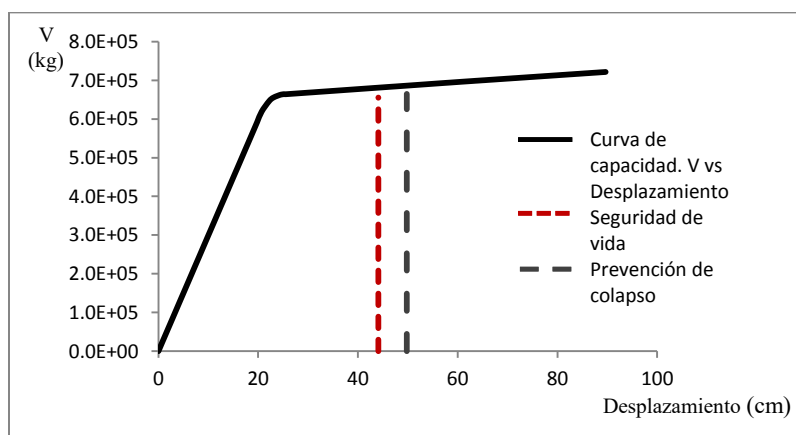


Figura.A.3.112 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M177

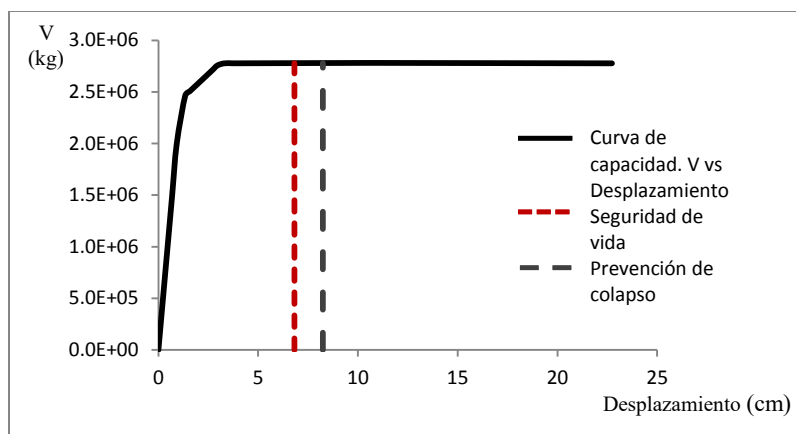


Figura.A.3.113 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M183

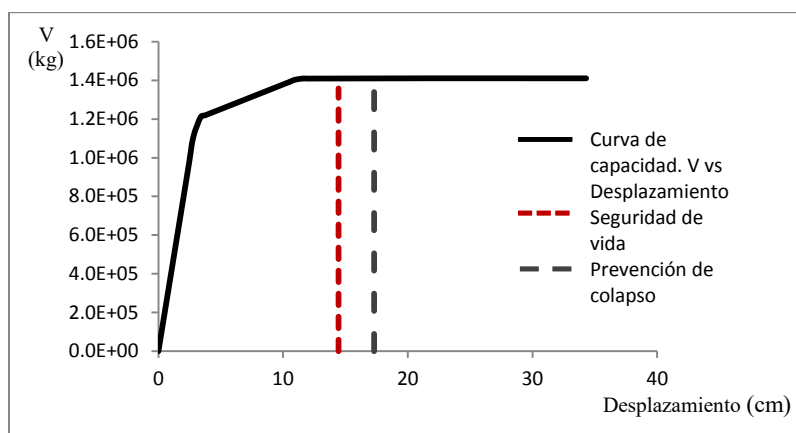


Figura.A.3.114 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M184

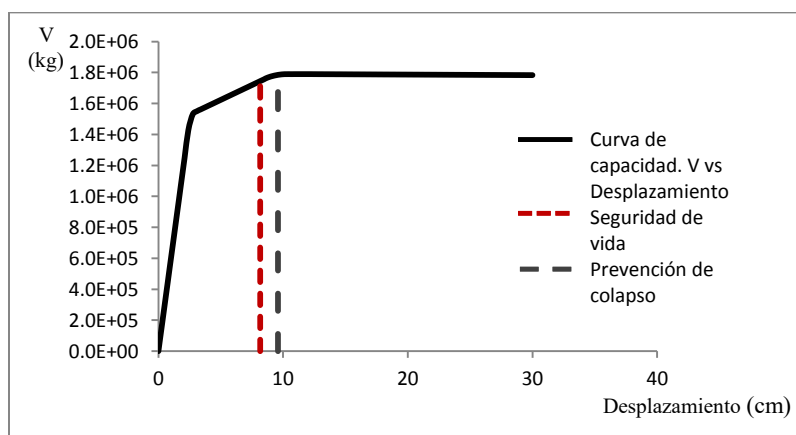


Figura.A.3.115 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M185

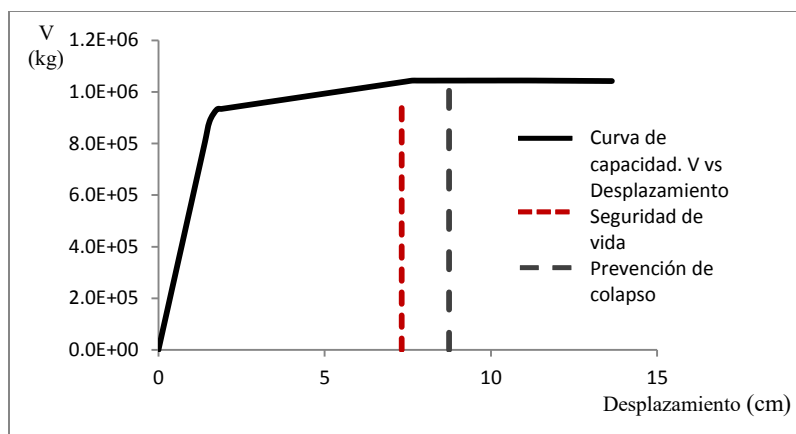


Figura.A.3.116 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M186

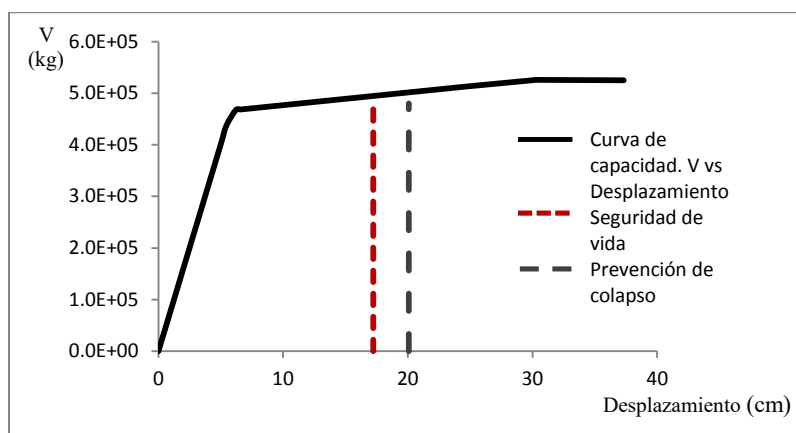


Figura.A.3.117 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M187

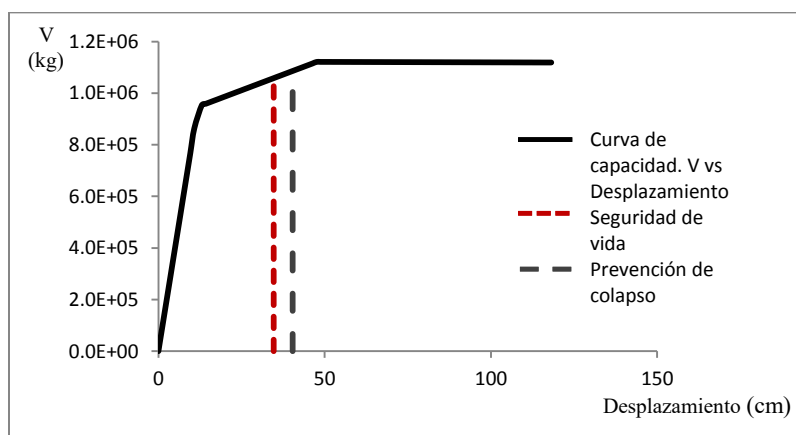


Figura.A.3.118 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M188

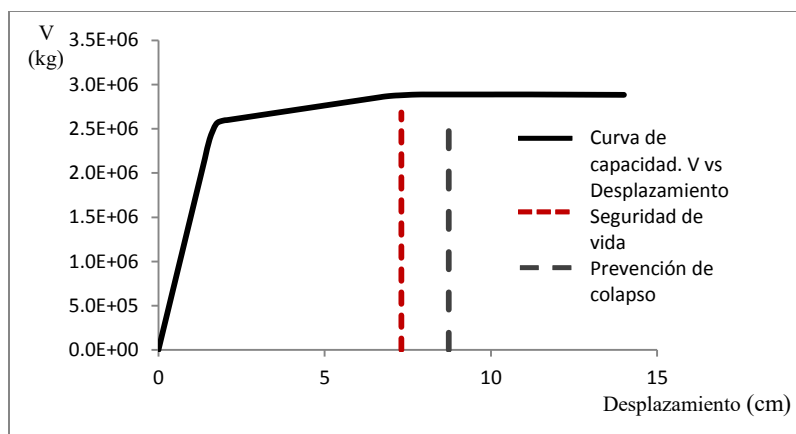


Figura.A.3.119 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M189

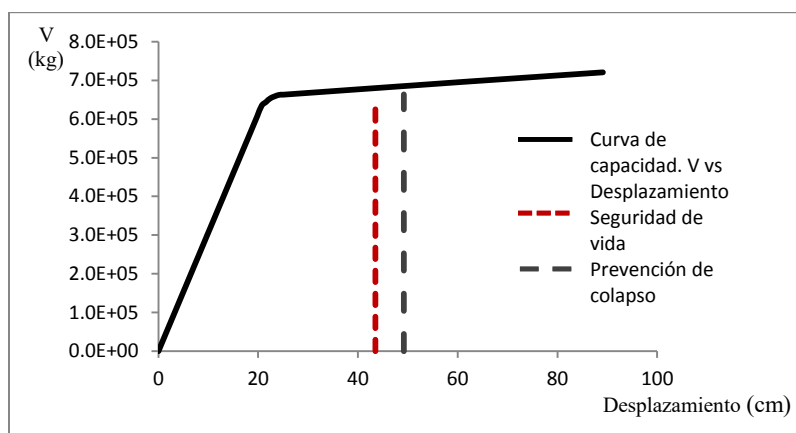


Figura.A.3.120 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M190

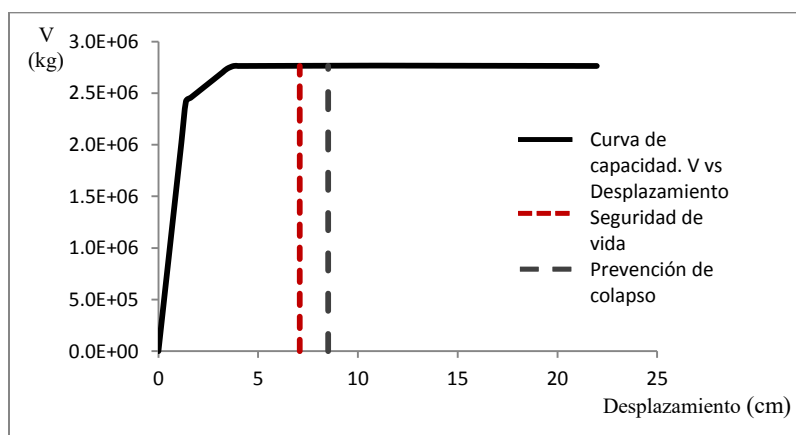


Figura.A.3.121 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M196

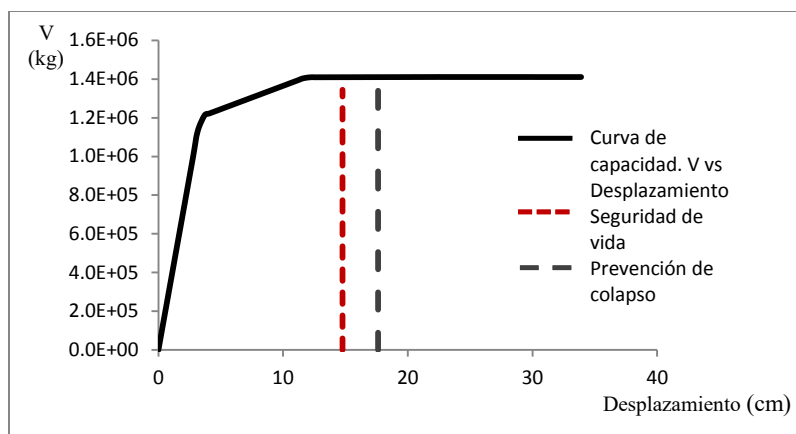


Figura.A.3.122 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M197

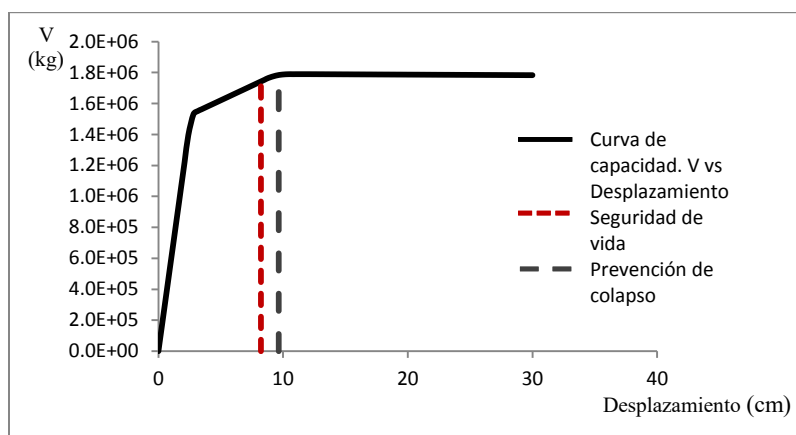


Figura.A.3.123 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M198

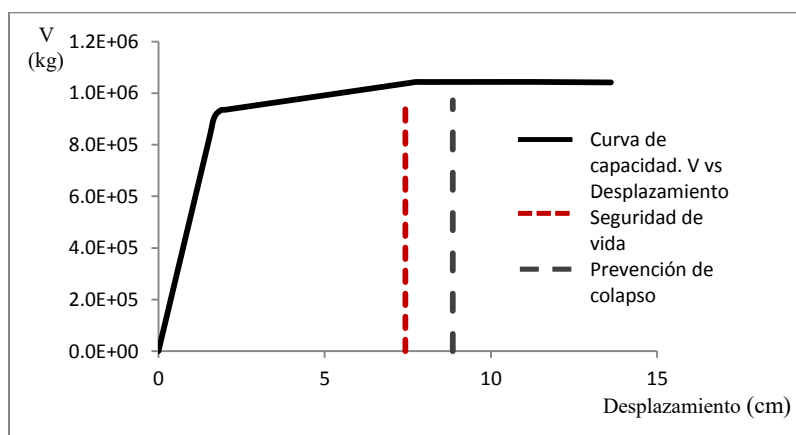


Figura.A.3.124 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M199

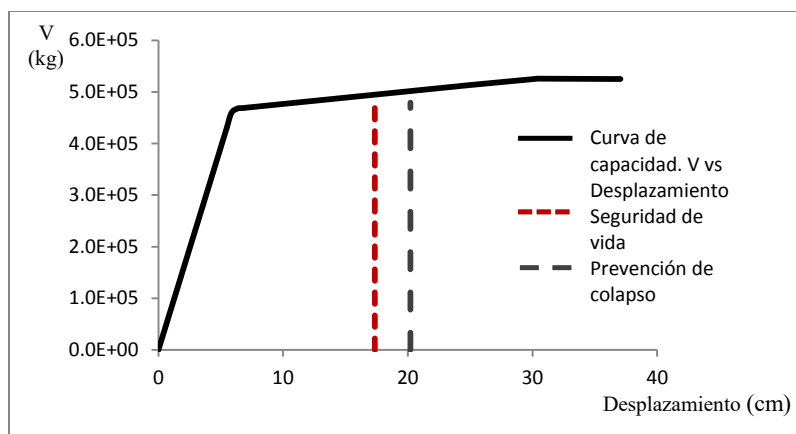


Figura.A.3.125 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M200

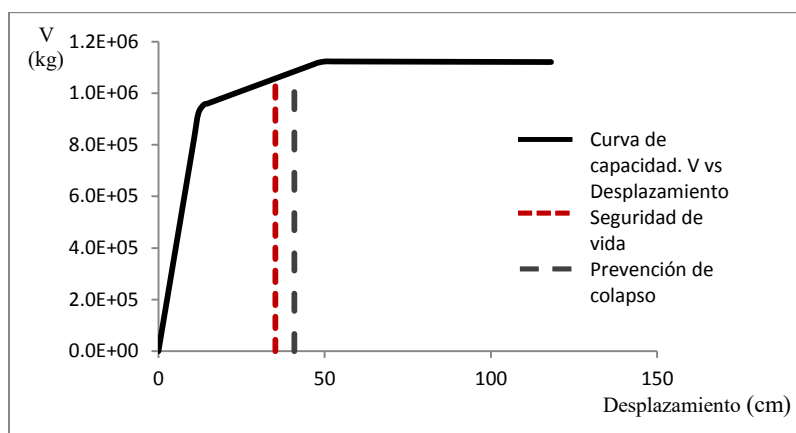


Figura.A.3.126 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M201

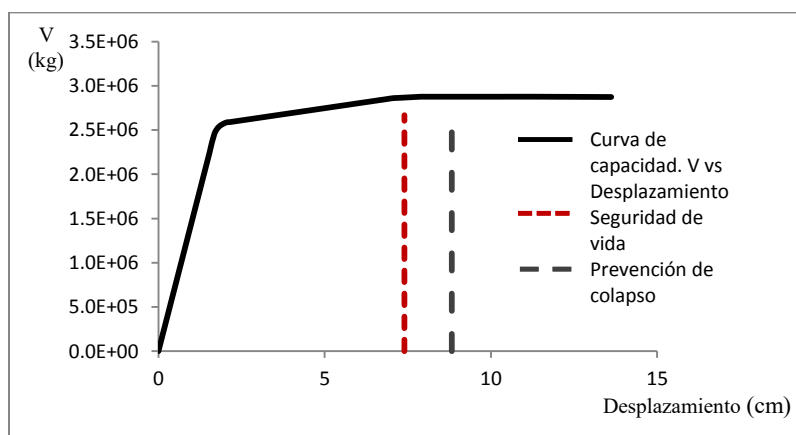


Figura.A.3.127 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M202

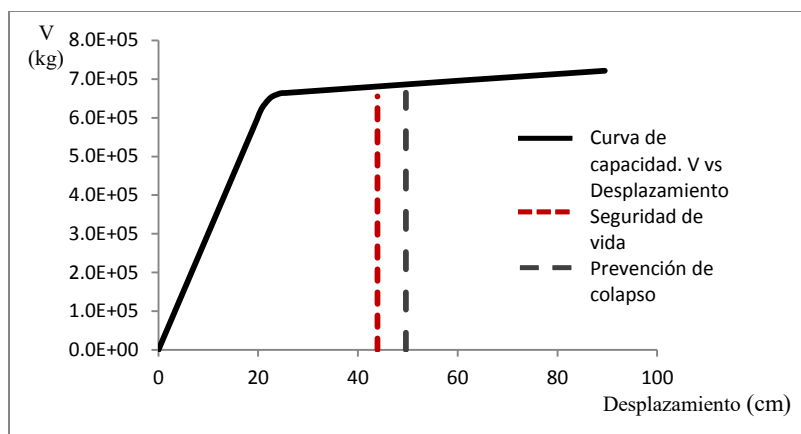


Figura.A.3.128 Curva de capacidad y desplazamientos últimos para un nivel de desempeño de seguridad de vida y de prevención de colapso del modelo M203

APÉNDICE B. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE LAS PILAS DE PUENTE

B.1 Introducción

En el apéndice B de este trabajo de investigación se muestran los diagramas de interacción de las pilas centrales y pilas extremas de los distintos modelos de estudio en la dirección longitudinal y transversal de análisis.

B.2 Diagramas de interacción de las pilas de puente en dirección longitudinal

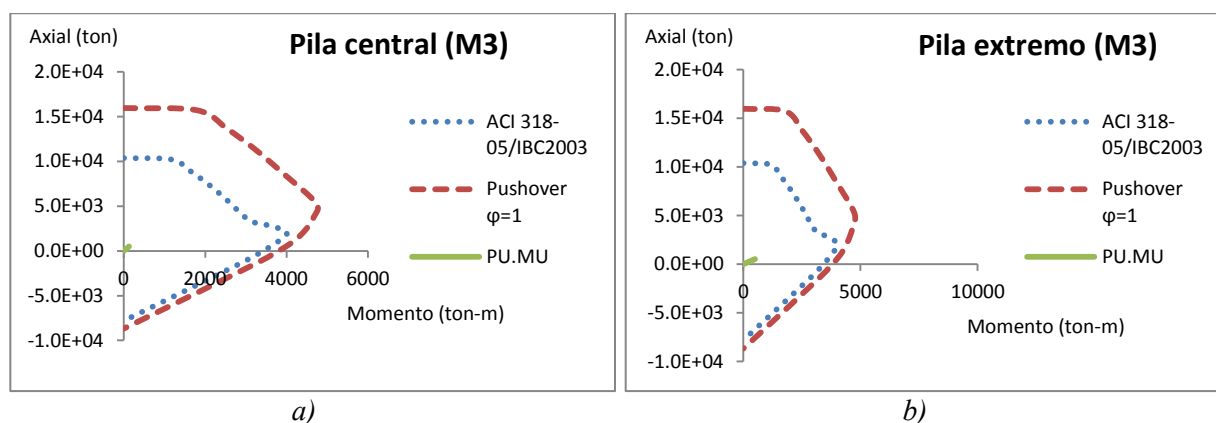


Figura.B.2.1 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M118 y M079 para: a) pila central y b) pila extremo

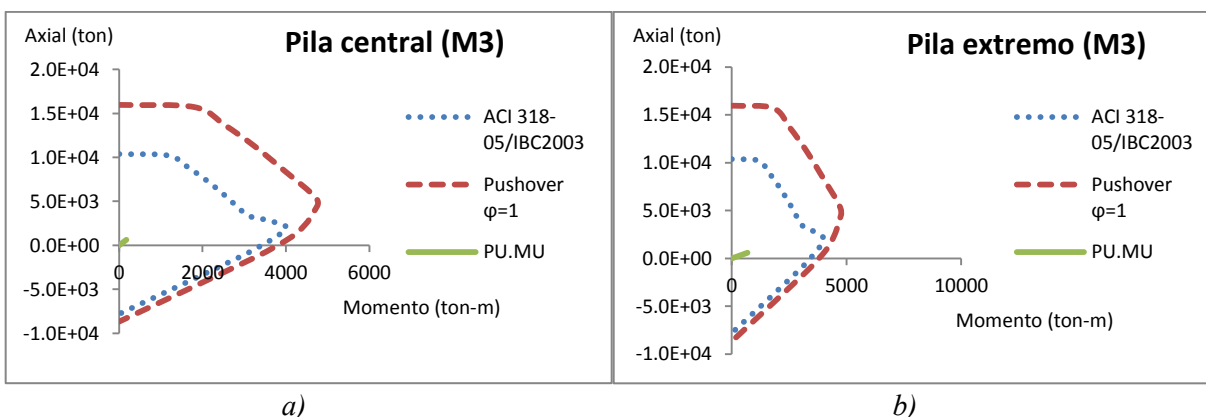


Figura.B.2.2 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M119 y M080 para: a) pila central y b) pila extremo

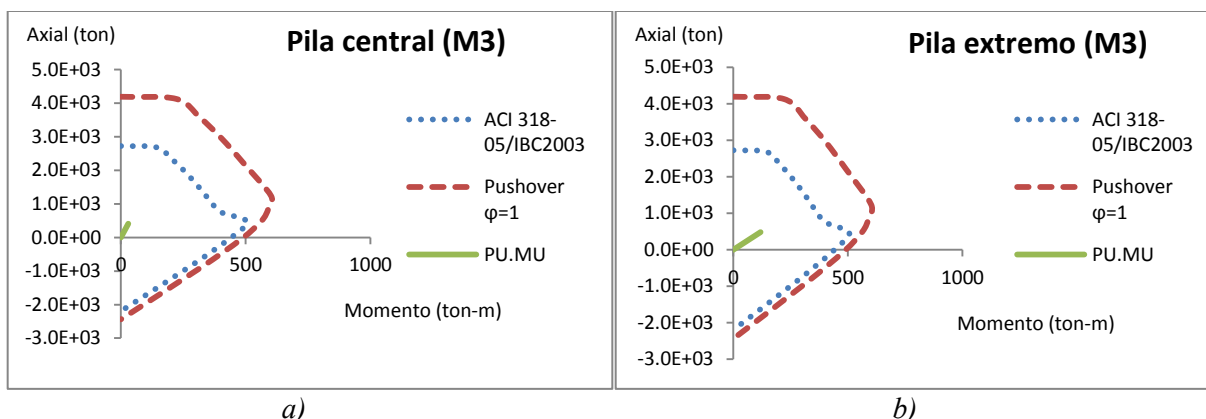


Figura.B.2.3 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M120 y M081 para: a) pila central y b) pila extremo

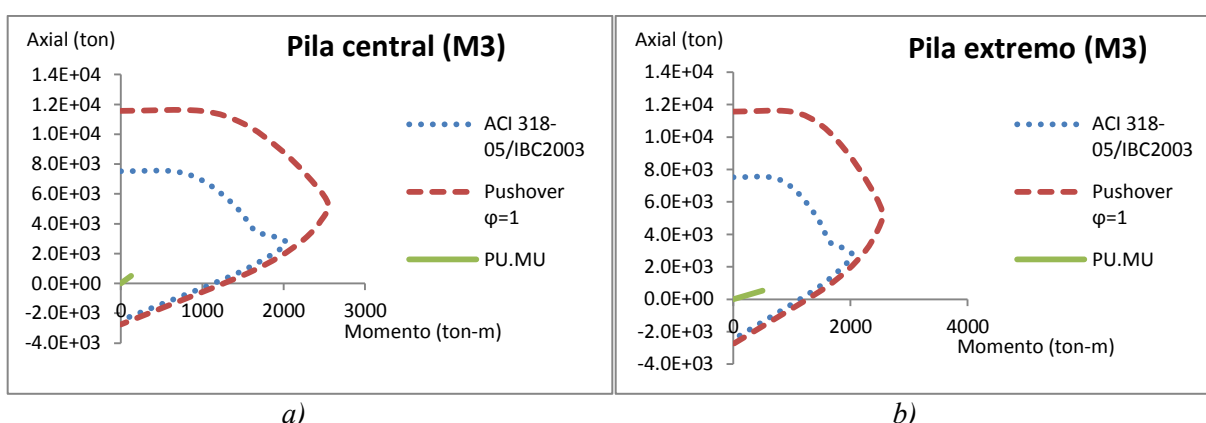


Figura.B.2.4 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M131, M092, M157, M170, M183 y M196 para: a) pila central y b) pila extremo

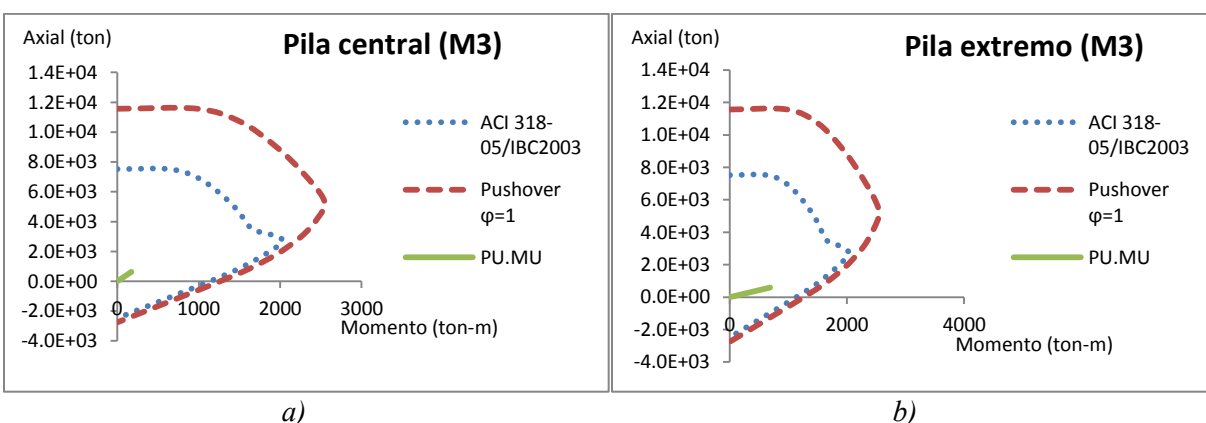


Figura.B.2.5 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M132, M093, M158, M171, M184 y M197 para: a) pila central y b) pila extremo

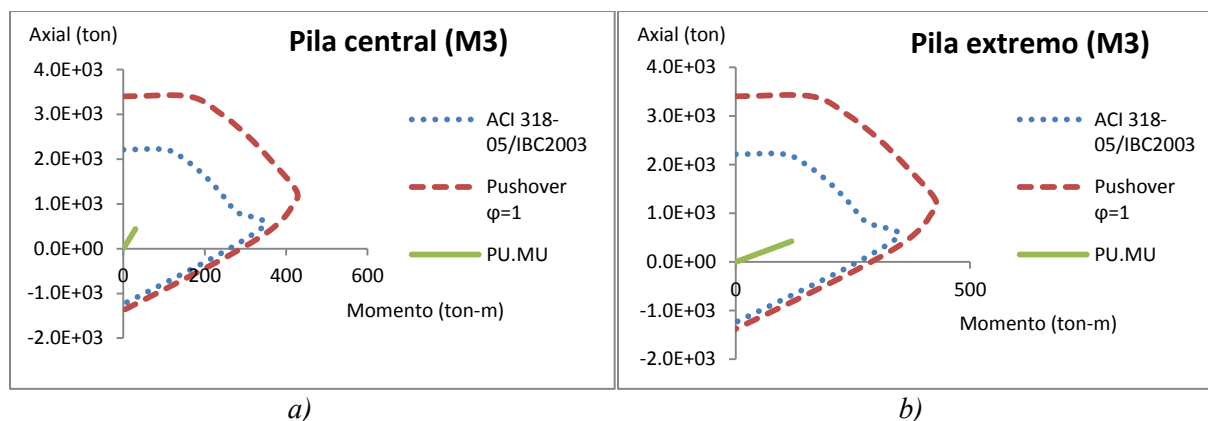


Figura.B.2.6 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M133, M094, M159, M172, M185 y M198 para: a) pila central y b) pila extremo

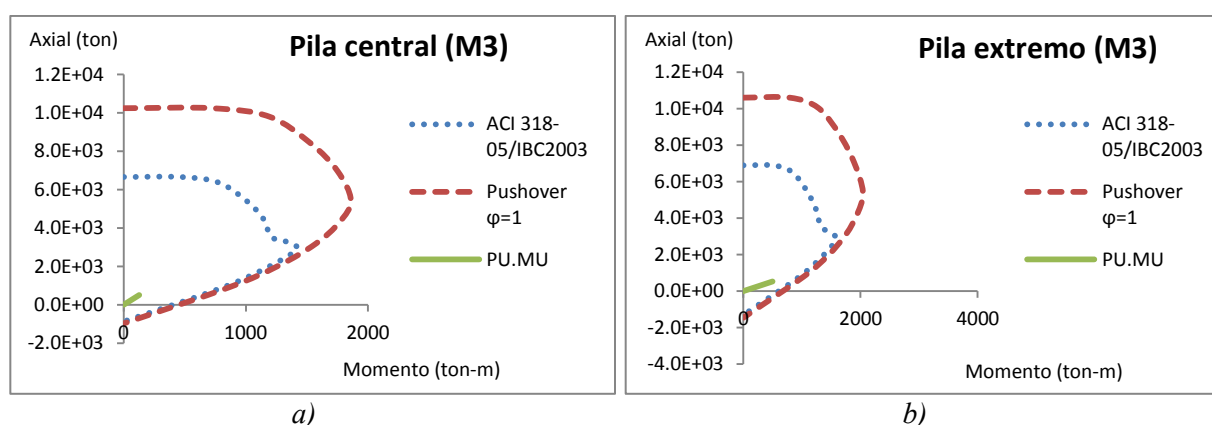


Figura.B.2.7 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M144 y M092 para: a) pila central y b) pila extremo

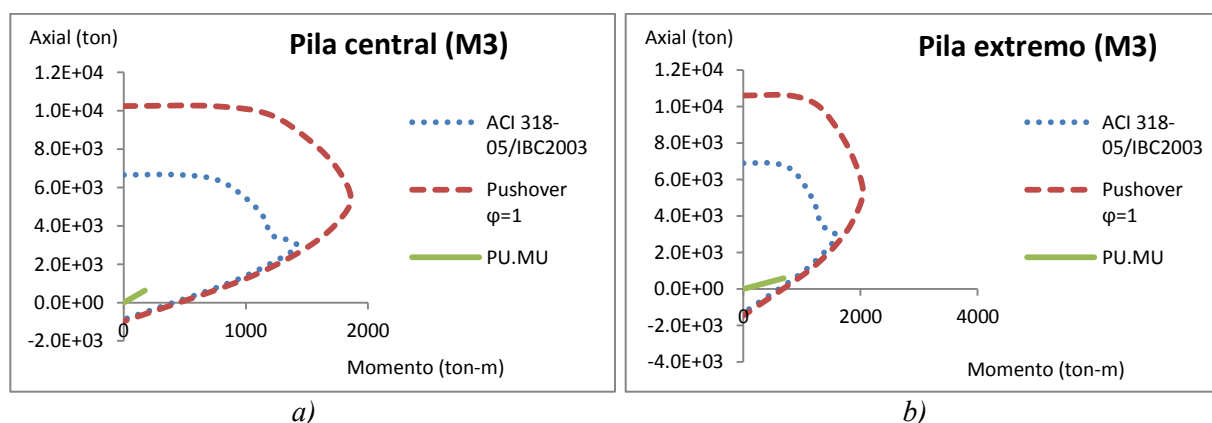


Figura.B.2.8 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M145 y M093 para: a) pila central y b) pila extremo

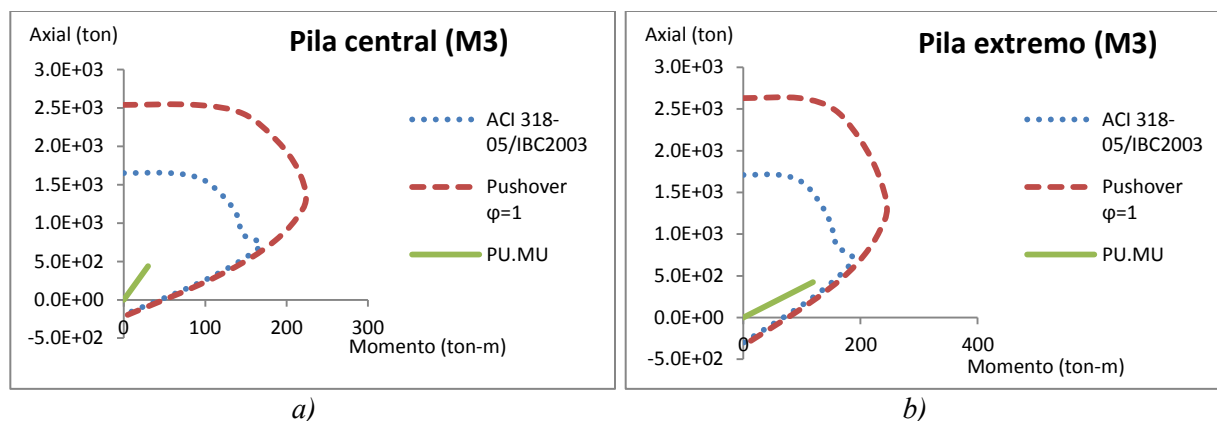


Figura.B.2.9 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M146 y M094 para: a) pila central y b) pila extremo

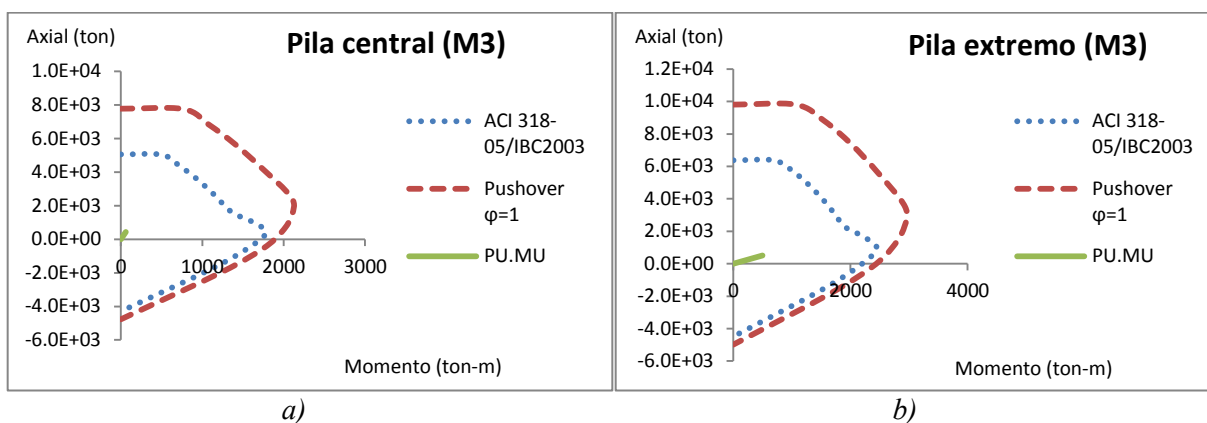


Figura.B.2.10 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M121 y M082 para: a) pila central y b) pila extremo

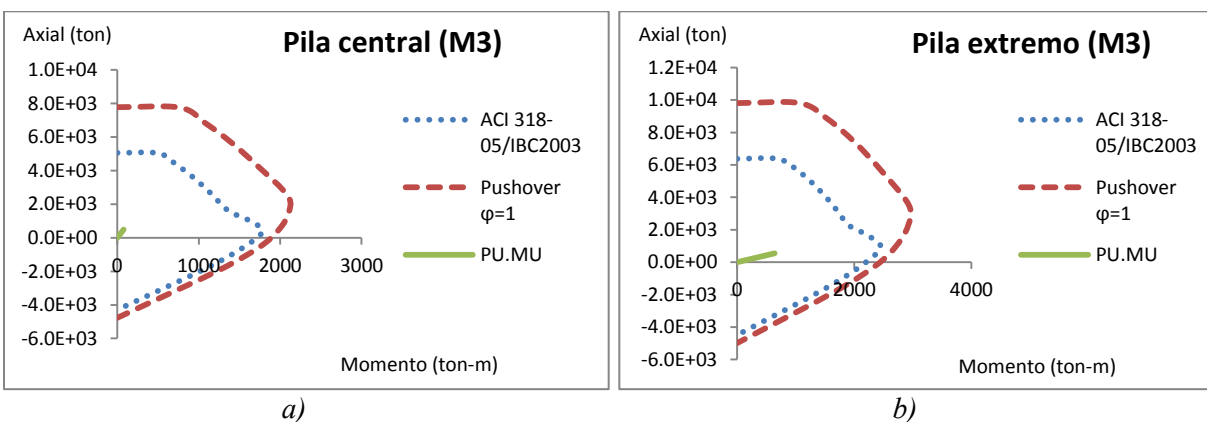


Figura.B.2.11 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M122 y M083 para: a) pila central y b) pila extremo

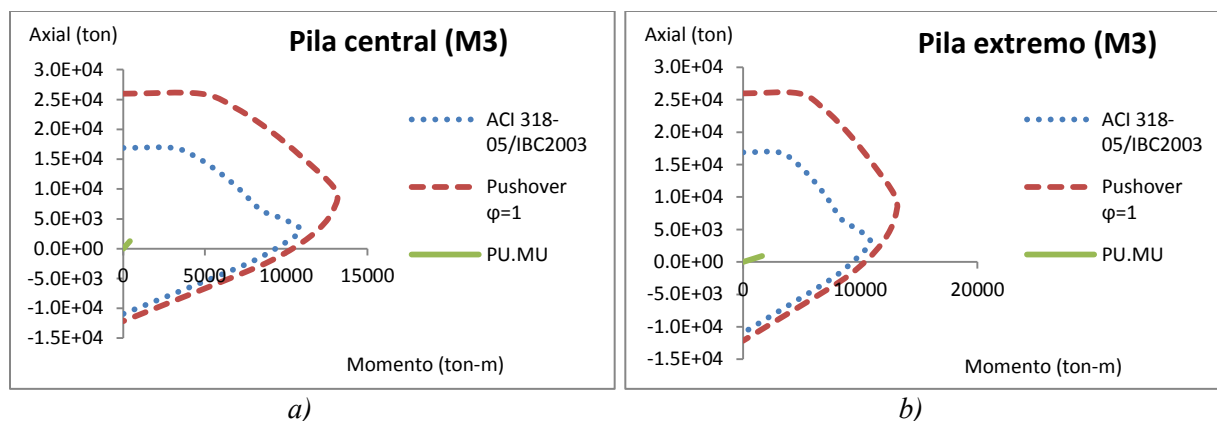


Figura.B.2.12 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M123 y M084 para: a) pila central y b) pila extremo

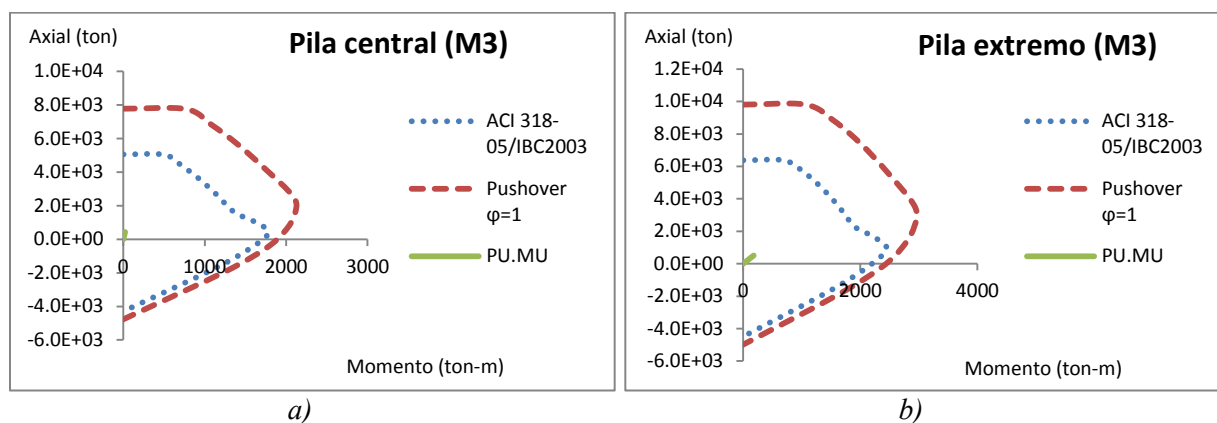


Figura.B.2.13 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M124 y M085 para: a) pila central y b) pila extremo

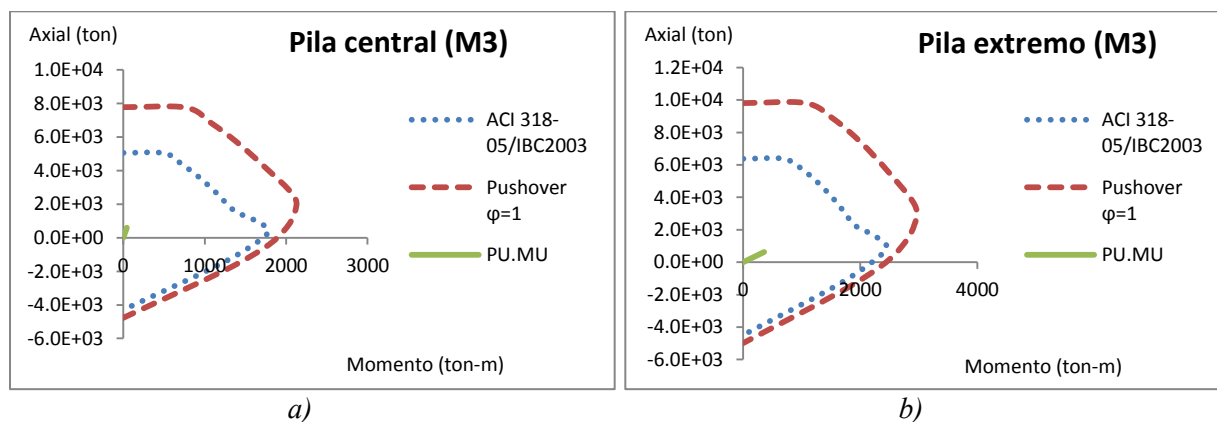


Figura.B.2.14 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M125 y M086 para: a) pila central y b) pila extremo

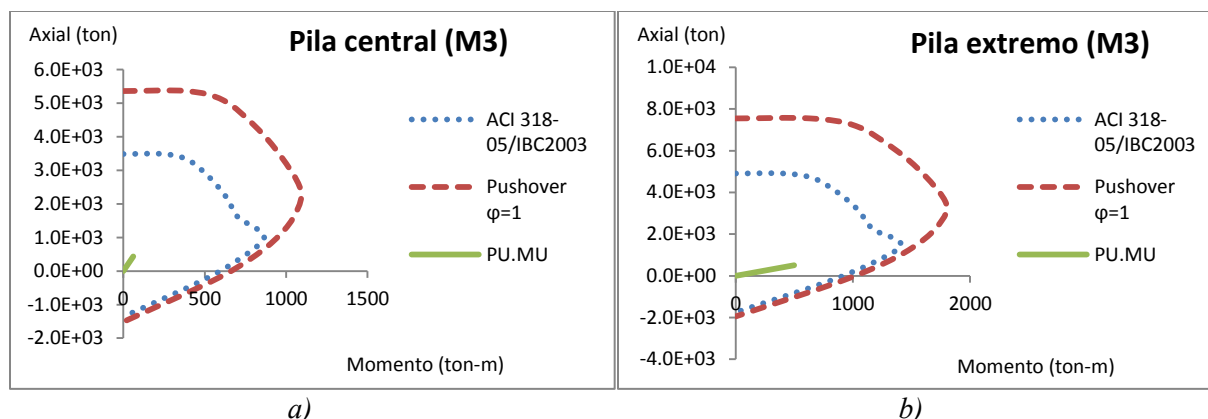


Figura.B.2.15 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M134, M095, M160, M173, M186 y M199 para: a) pila central y b) pila extremo

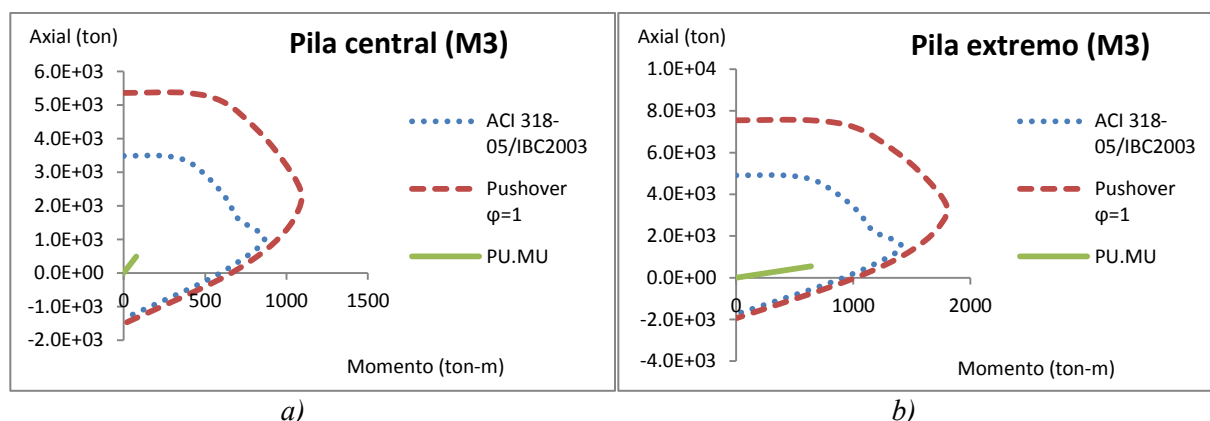


Figura.B.2.16 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M135, M096, M161, M174, M187 y M174 para: a) pila central y b) pila extremo

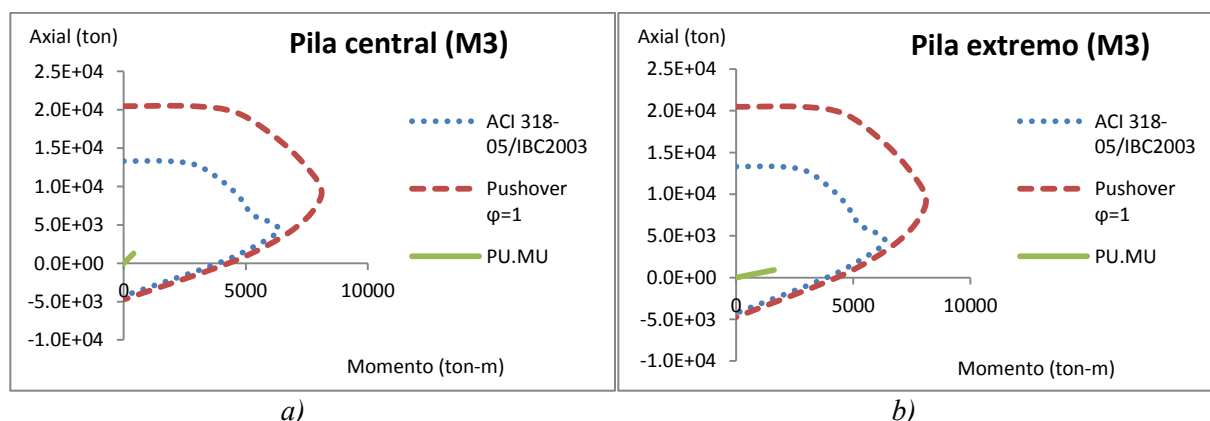


Figura.B.2.17 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M136, M097, M162, M175, M188 y M175 para: a) pila central y b) pila extremo

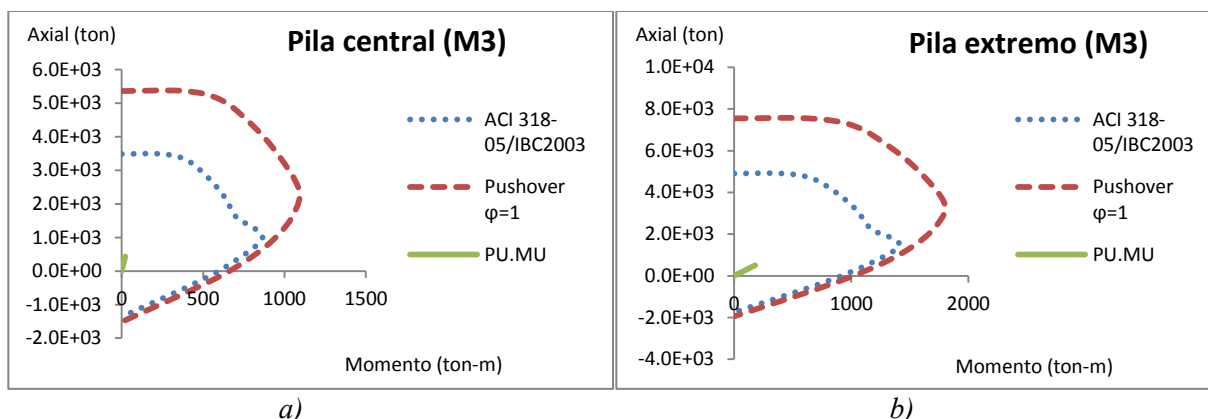


Figura.B.2.18 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M137, M098, M163, M176, M189 y M202 para: a) pila central y b) pila extremo

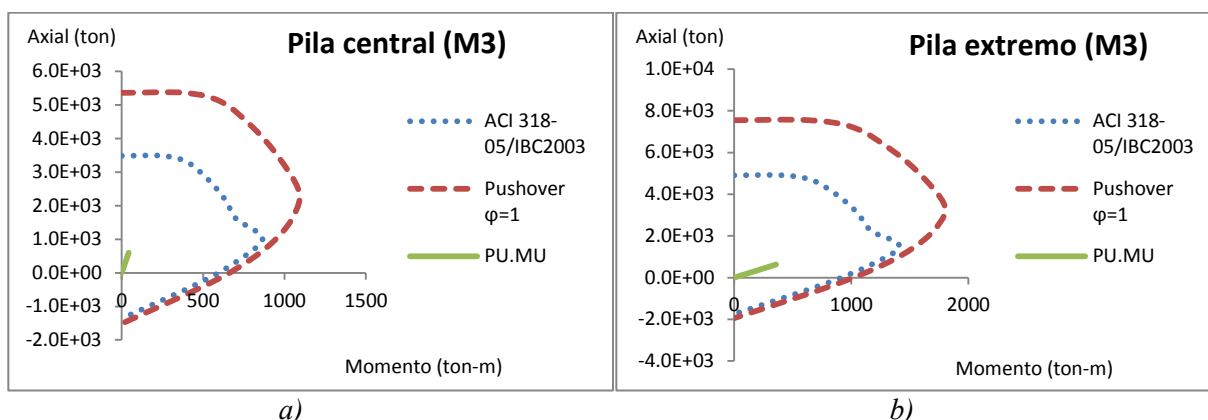


Figura.B.2.19 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M138, M099, M164, M177, M190 y M203 para: a) pila central y b) pila extremo

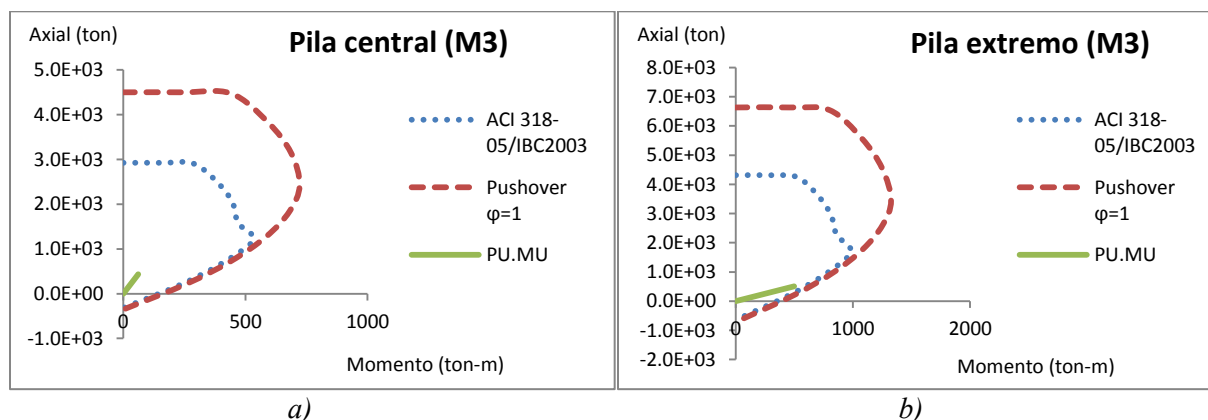


Figura.B.2.20 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M147 y M108 para: a) pila central y b) pila extremo

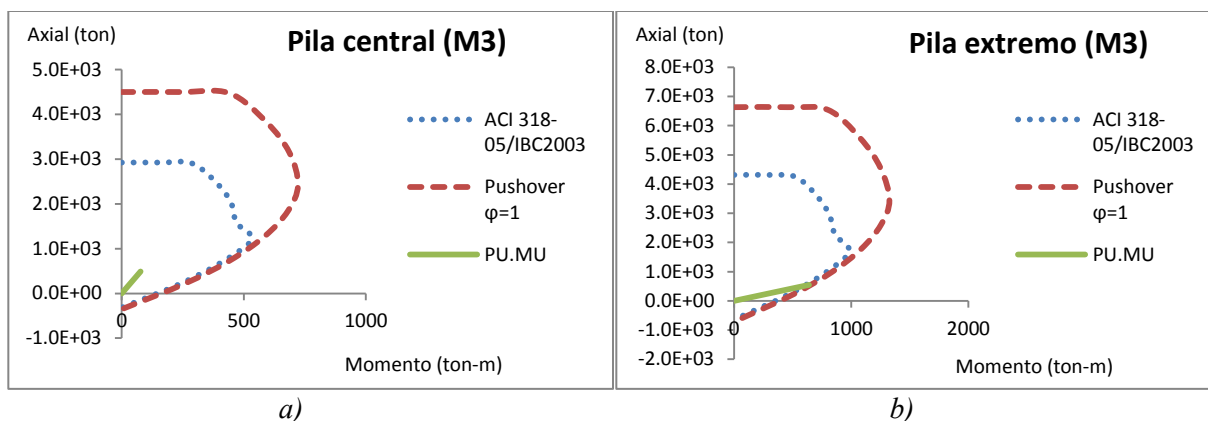


Figura.B.2.21 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M148 y M109 para: a) pila central y b) pila extremo

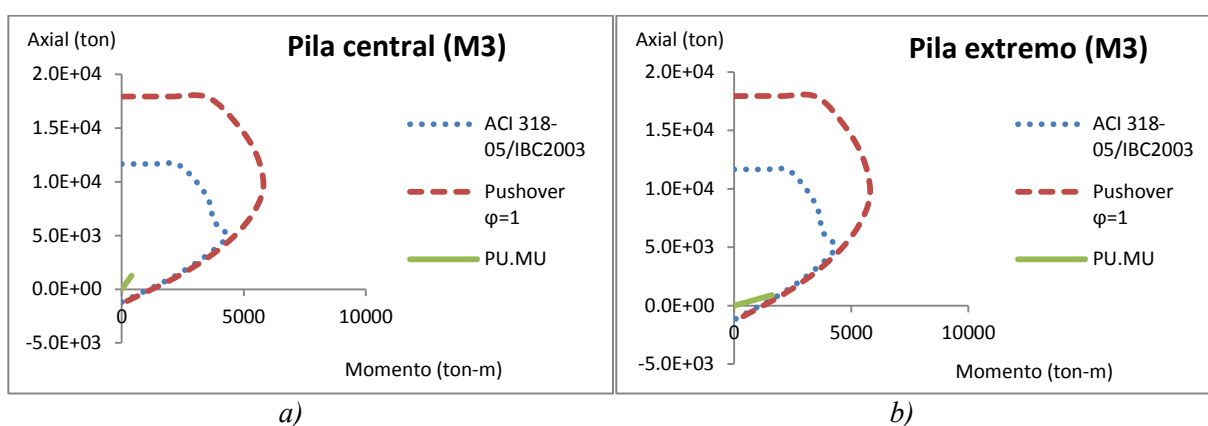


Figura.B.2.22 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M149 y M110 para: a) pila central y b) pila extremo

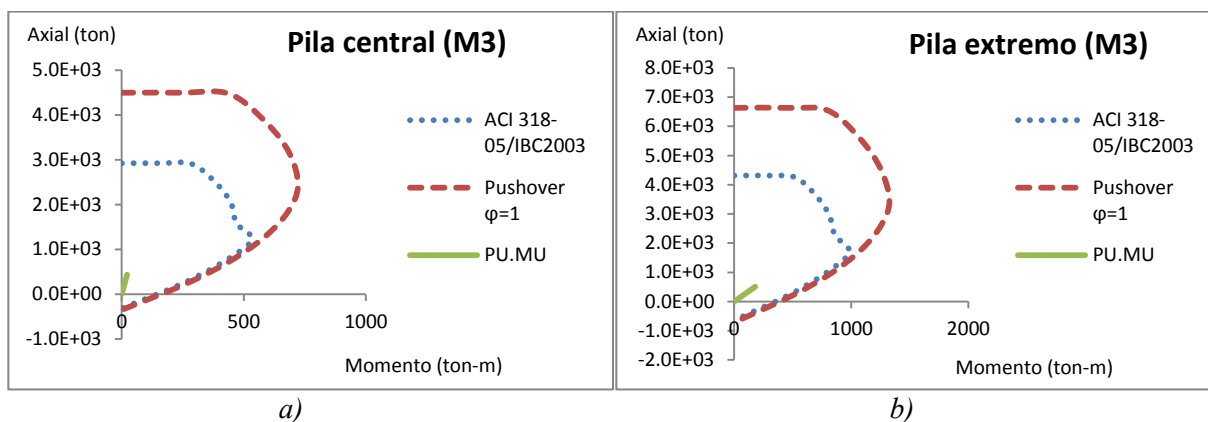


Figura.B.2.23 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M150 y M111 para: a) pila central y b) pila extremo

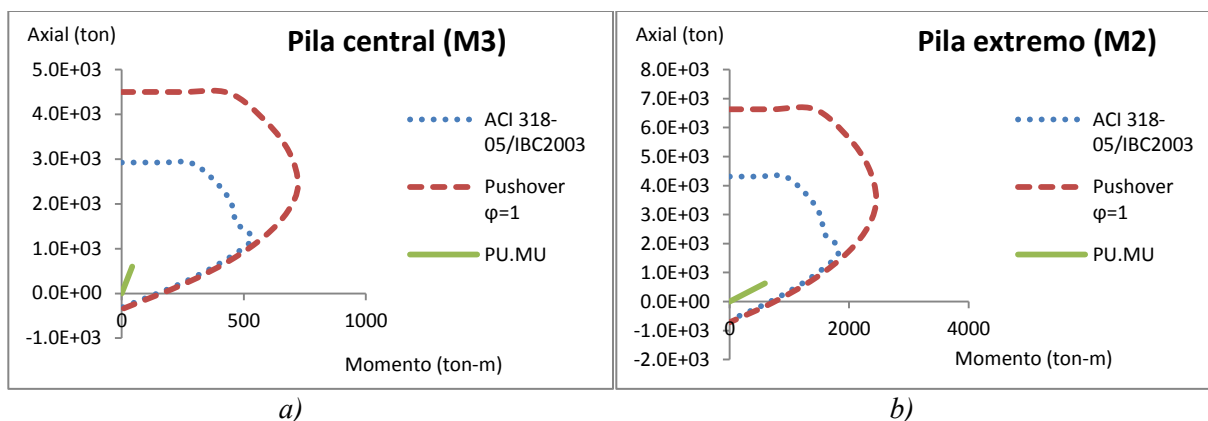


Figura.B.2.24 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M151 y M112 para: a) pila central y b) pila extremo

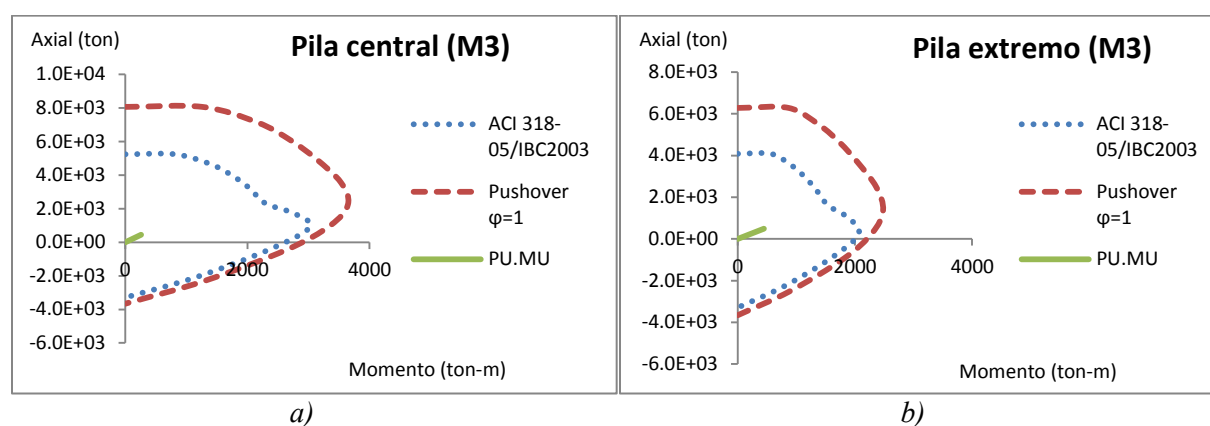


Figura.B.2.25 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M126 y M087 para: a) pila central y b) pila extremo

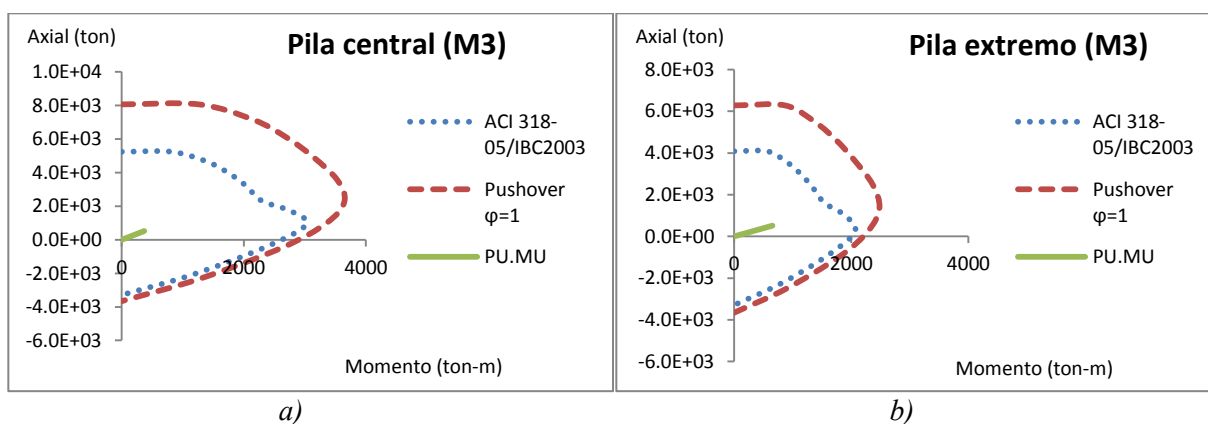


Figura.B.2.26 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M127 y M088 para: a) pila central y b) pila extremo

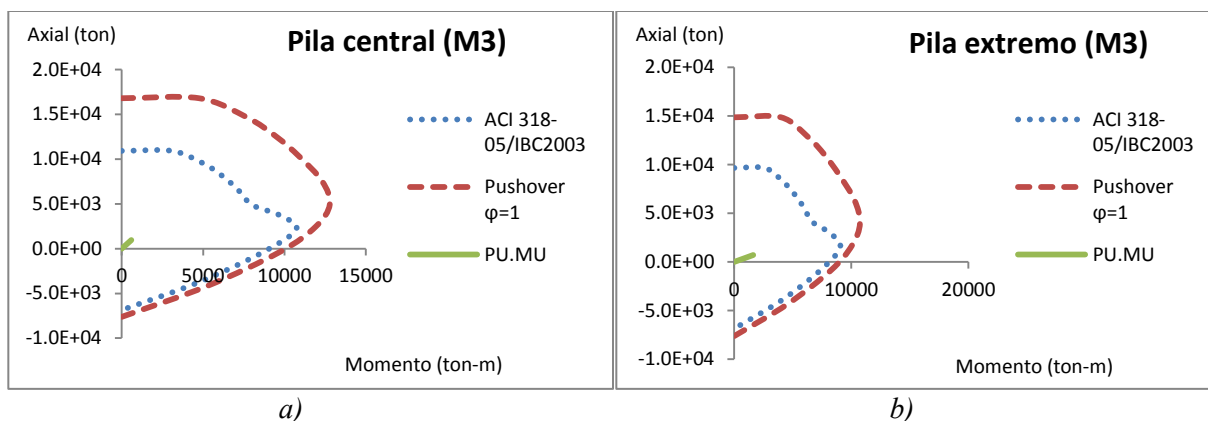


Figura.B.2.27 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M128 y M089 para: a) pila central y b) pila extremo

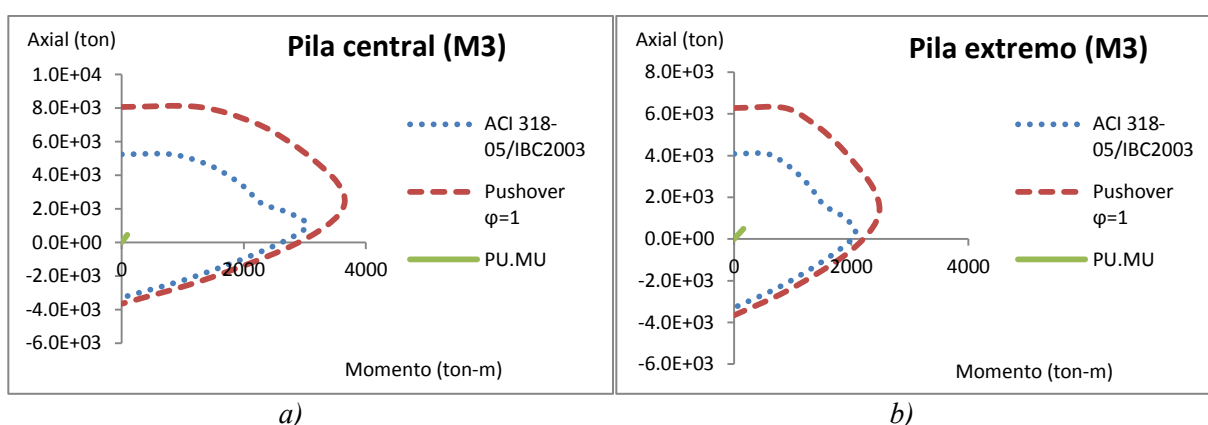


Figura.B.2.28 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M129 y M090 para: a) pila central y b) pila extremo

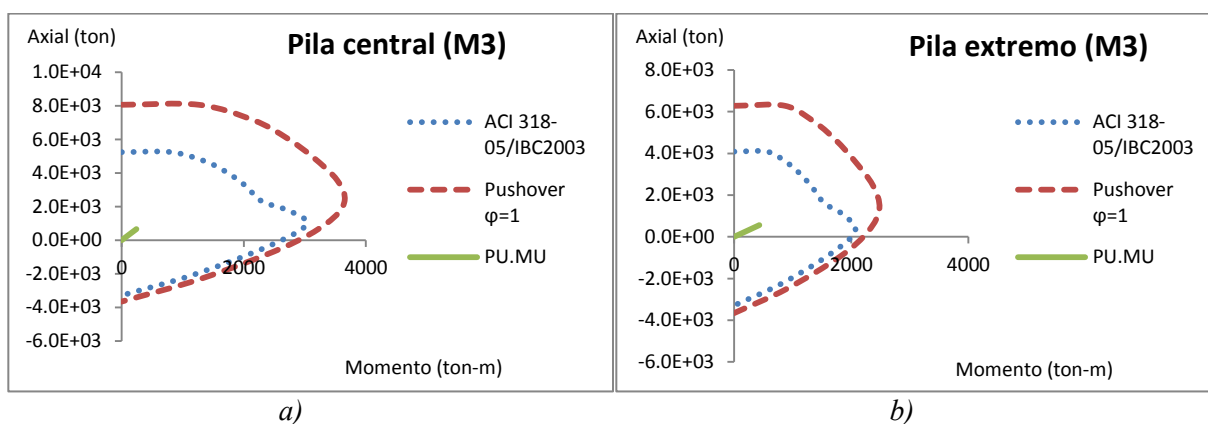


Figura.B.2.29 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M130 y M091 para: a) pila central y b) pila extremo

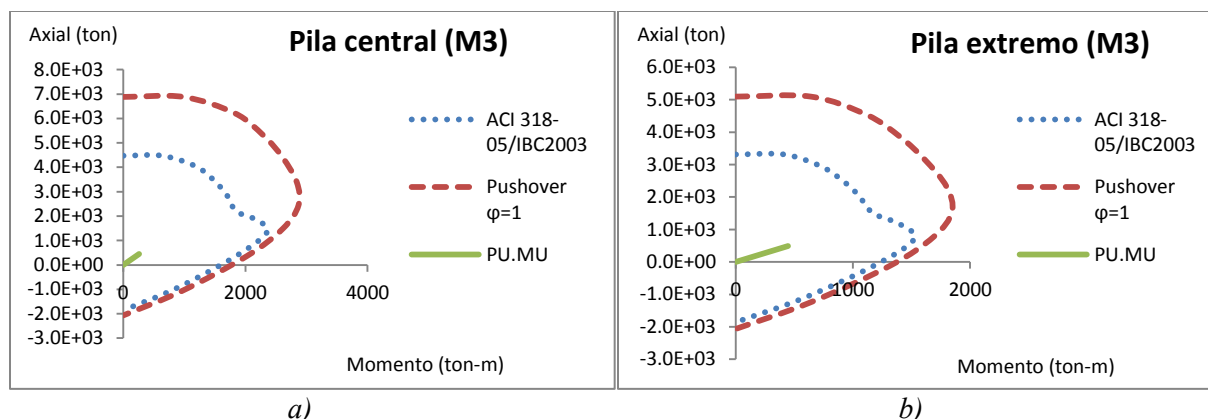


Figura.B.2.30 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M139, M100, M165, M178, M191 y M204 para: a) pila central y b) pila extremo

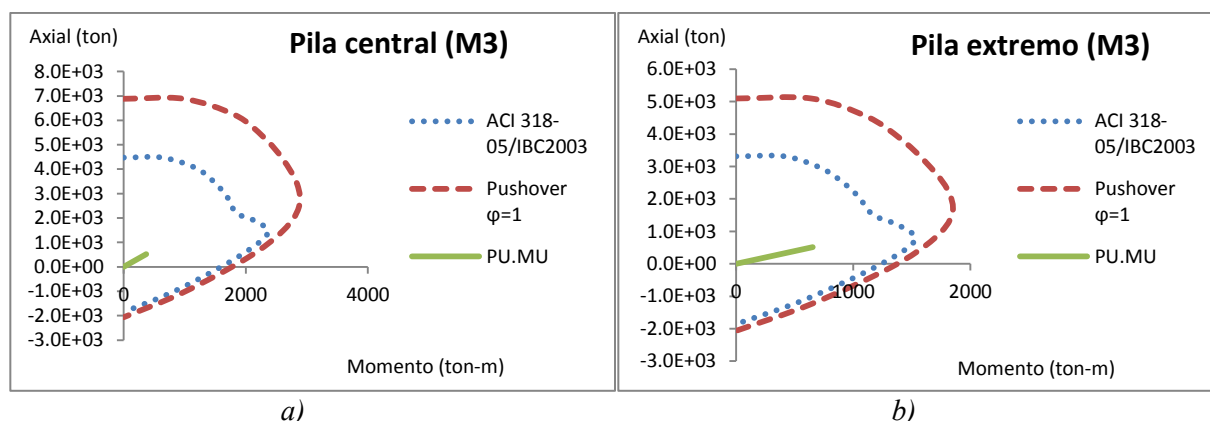


Figura.B.2.31 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M140, M101, M166, M179, M192 y M205 para: a) pila central y b) pila extremo

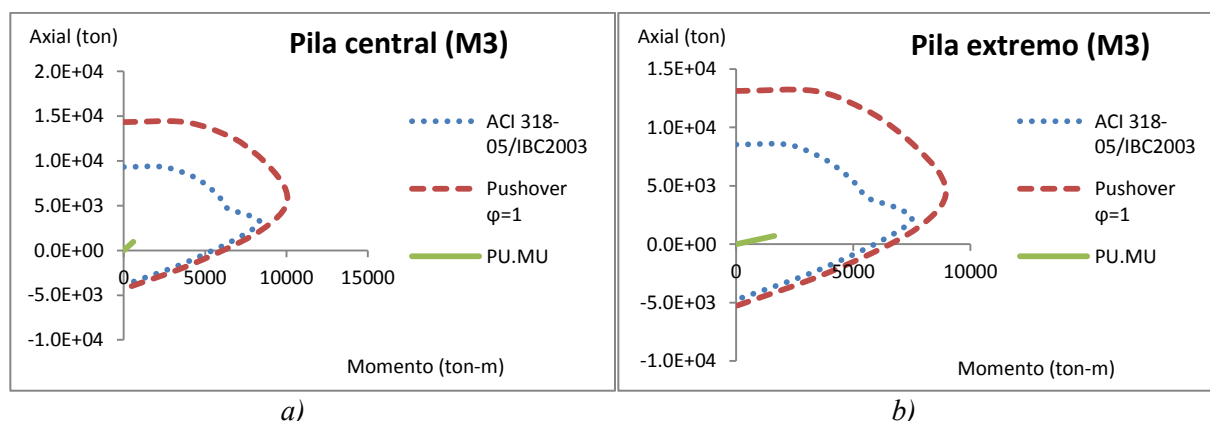


Figura.B.2.32 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M141, M102, M167, M180, M193 y M206 para: a) pila central y b) pila extremo

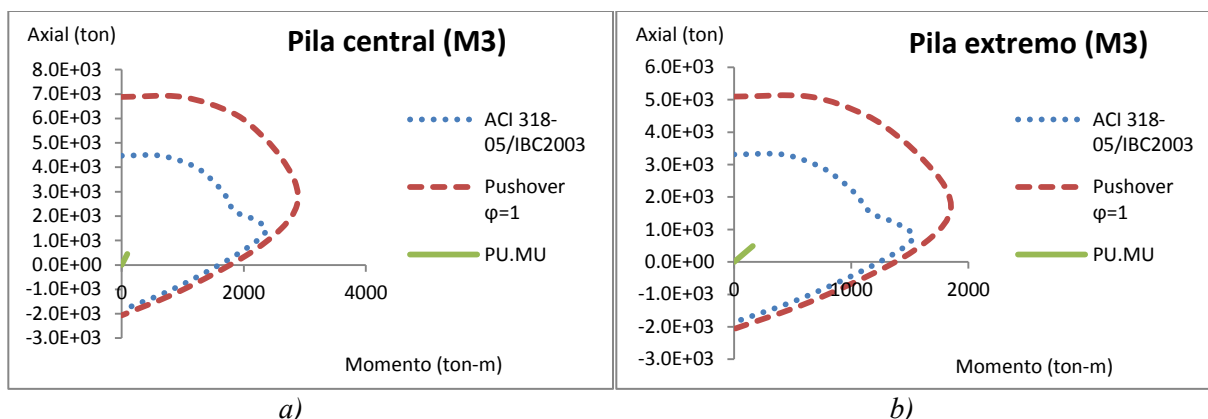


Figura.B.2.33 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M142, M103, M168, M181, M194 y M207 para: a) pila central y b) pila extremo

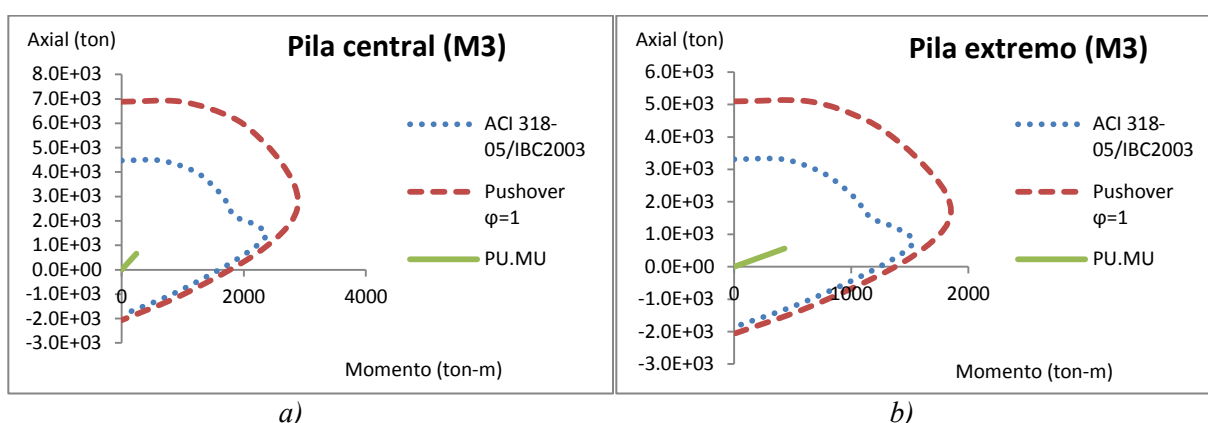


Figura.B.2.34 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M143, M104, M169, M182, M195 y M208 para: a) pila central y b) pila extremo

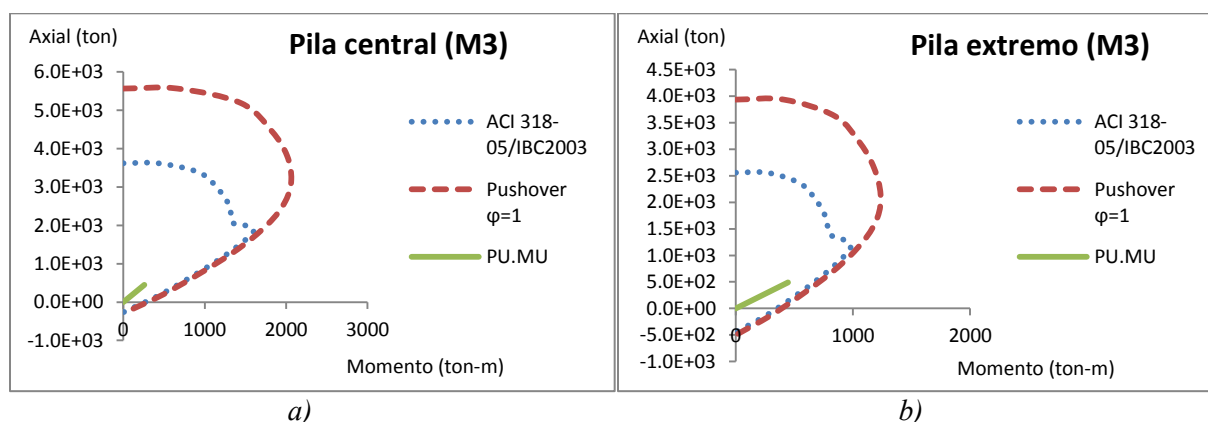


Figura.B.2.35 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M152 y M113 para: a) pila central y b) pila extremo

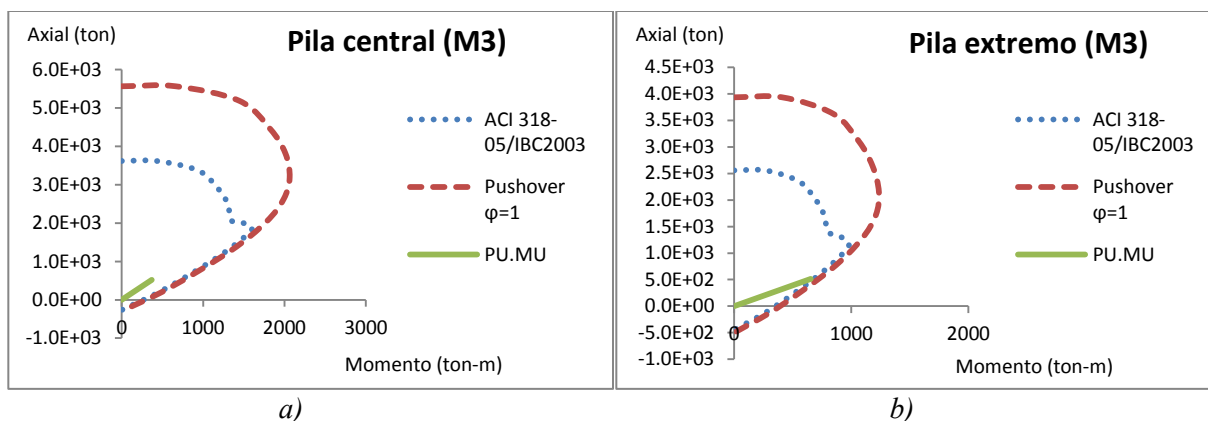


Figura.B.2.36 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M153 y M114 para: a) pila central y b) pila extremo

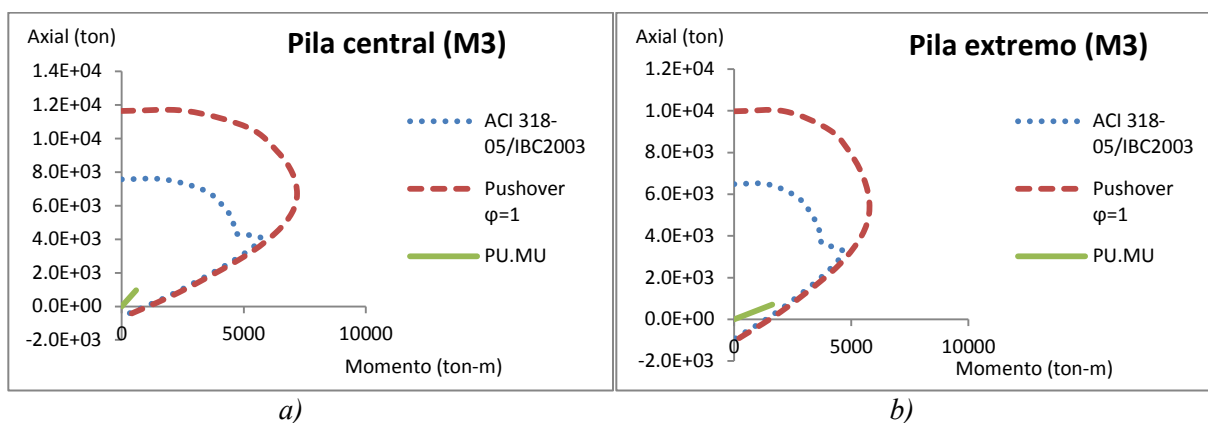


Figura.B.2.37 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M154 y M115 para: a) pila central y b) pila extremo

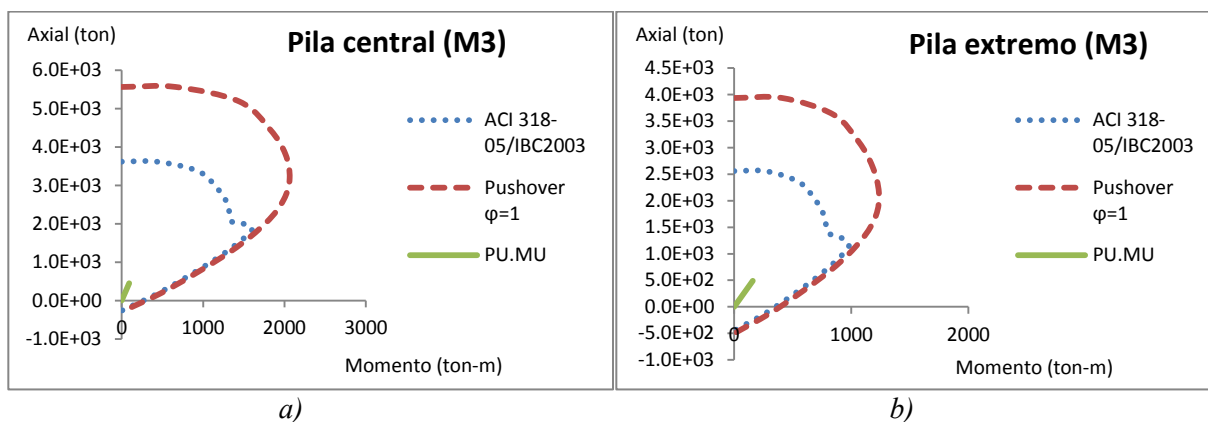


Figura.B.2.38 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M155 y M116 para: a) pila central y b) pila extremo

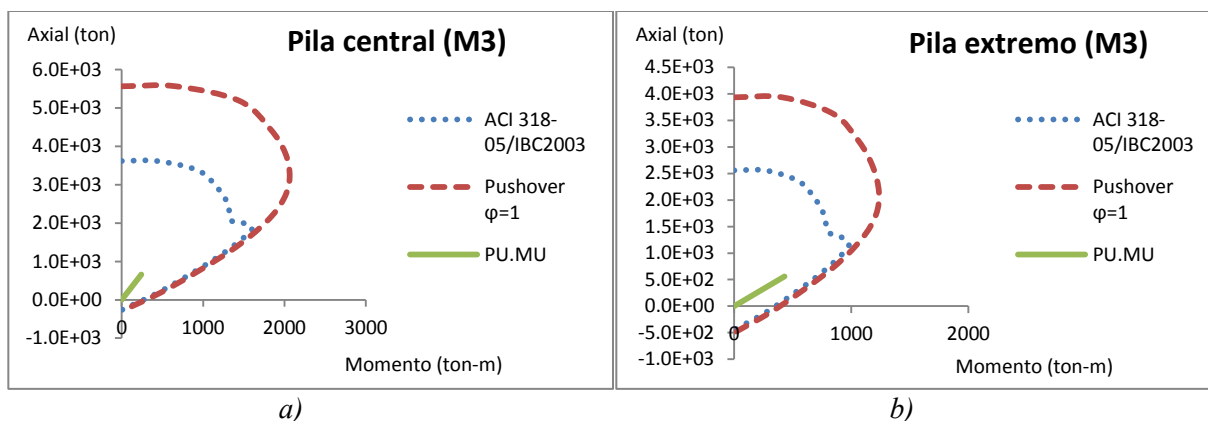


Figura.B.2.39 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M156 y M117 para: a) pila central y b) pila extremo

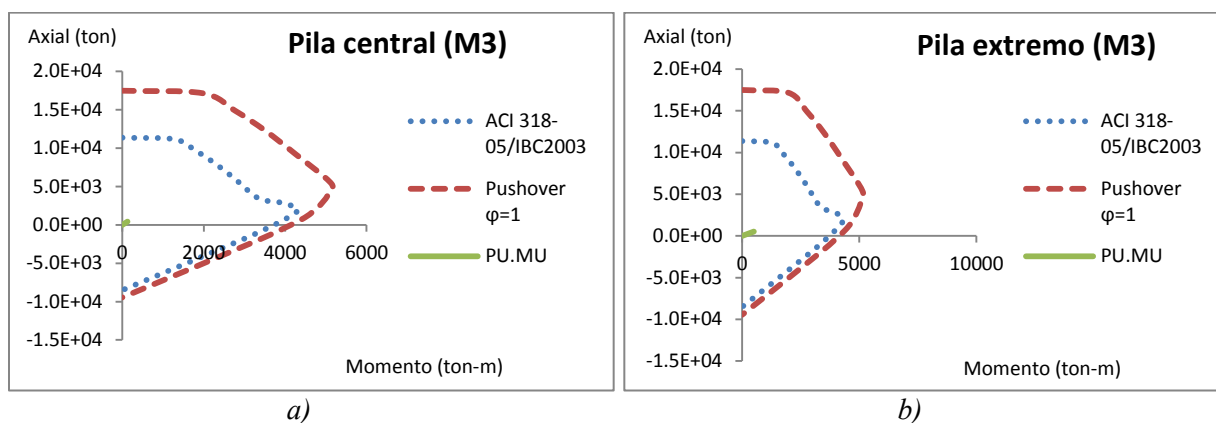


Figura.B.2.40 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M040 y M001 para: a) pila central y b) pila extremo

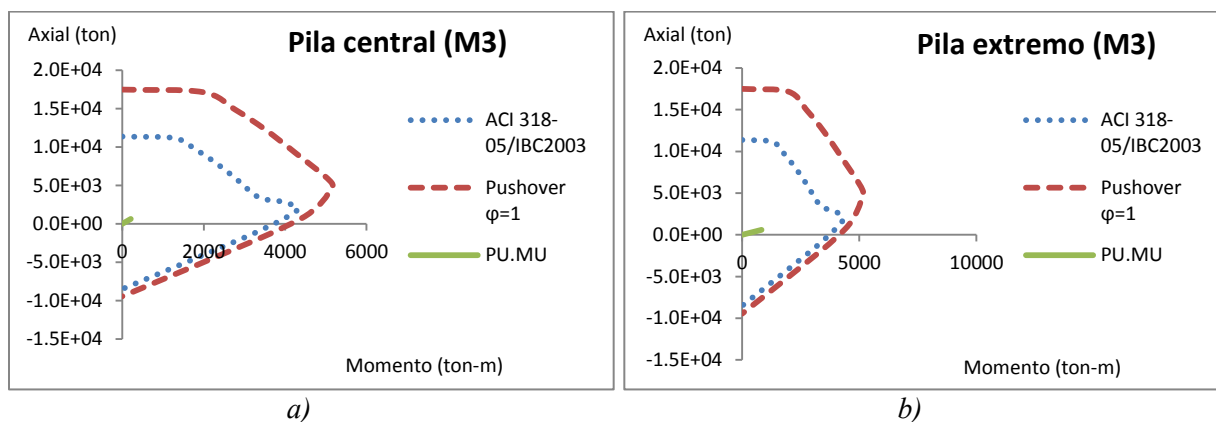


Figura.B.2.41 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M041 y M002 para: a) pila central y b) pila extremo

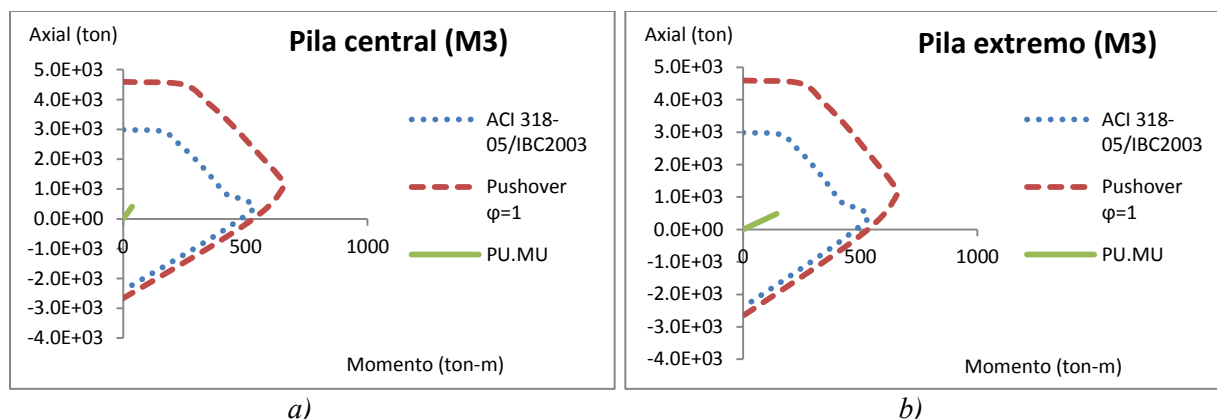


Figura.B.2.42 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M042 y M003 para: a) pila central y b) pila extremo

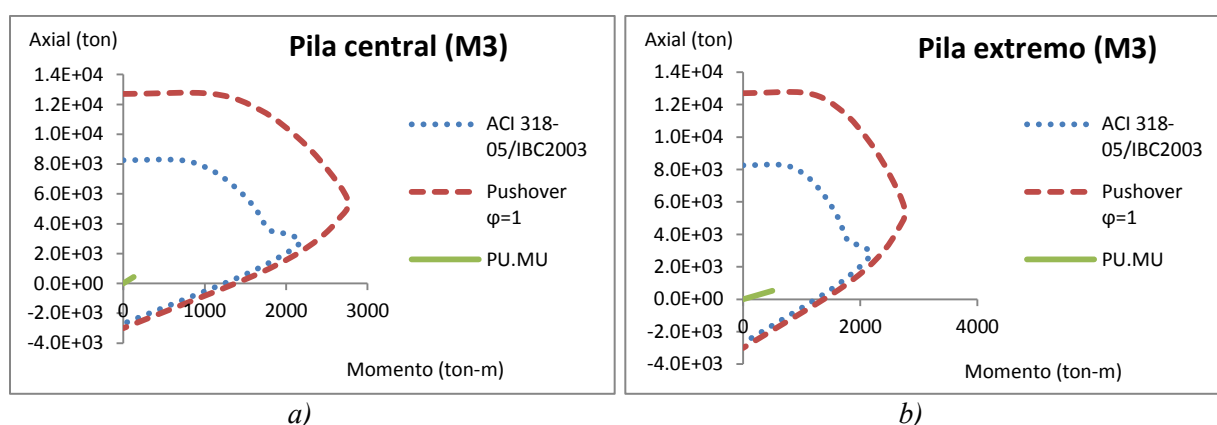


Figura.B.2.43 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M053 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo

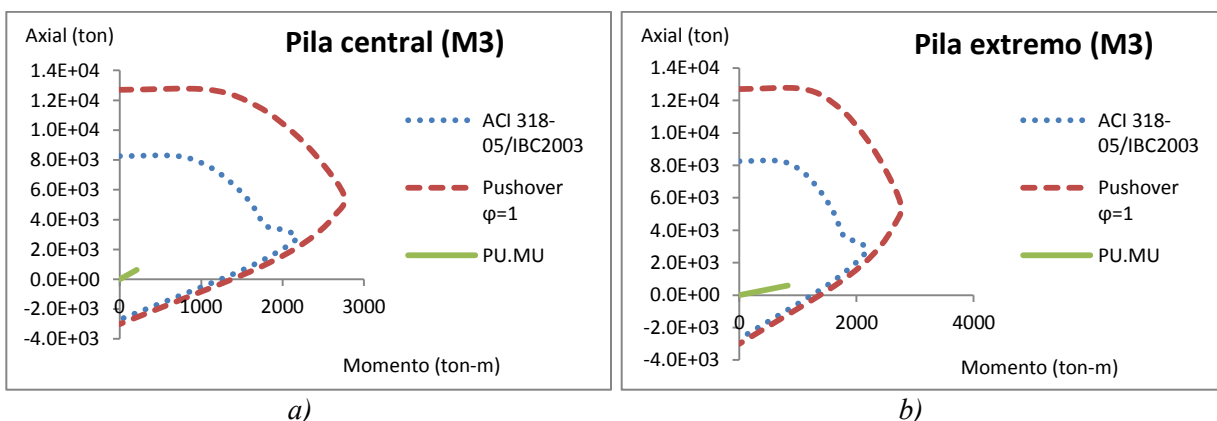


Figura.B.2.44 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M054 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo

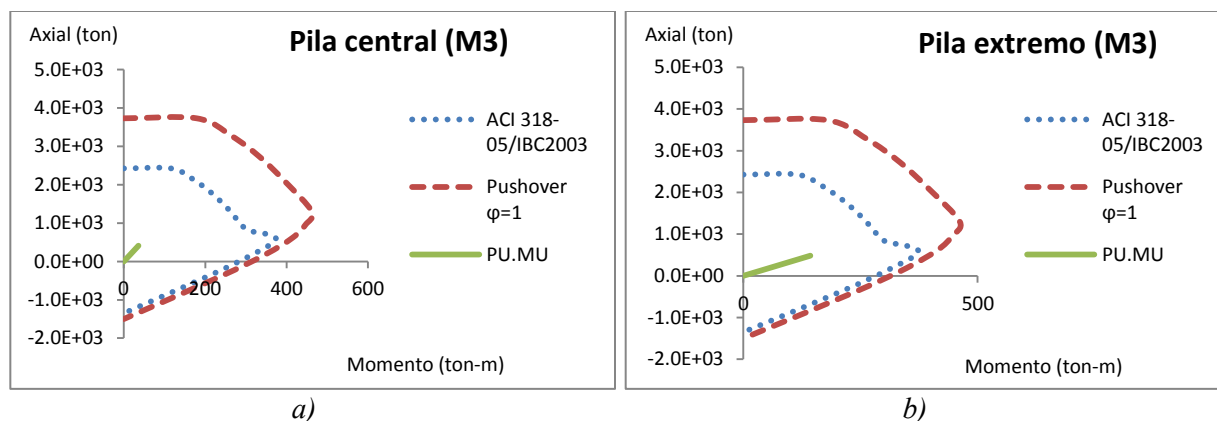


Figura.B.2.45 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M055 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo

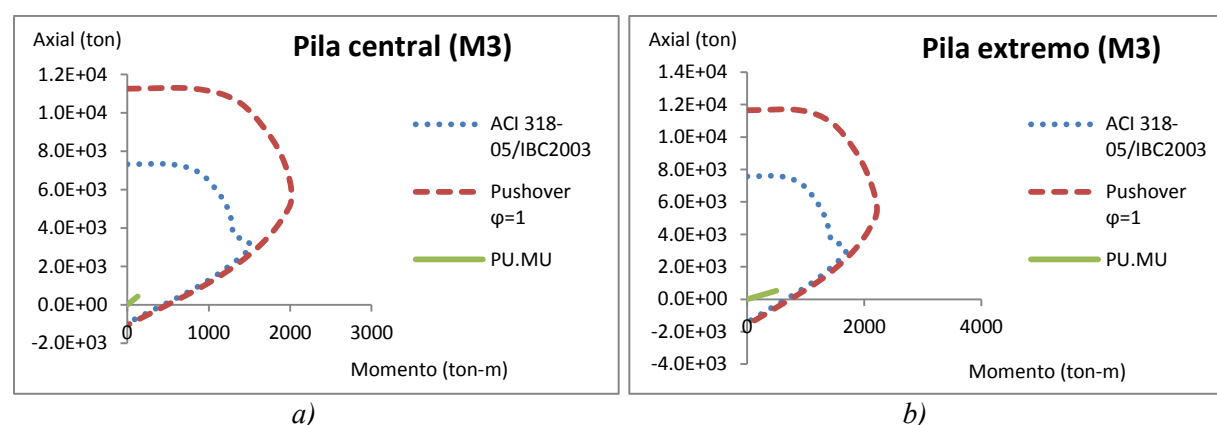


Figura.B.2.46 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M066 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo

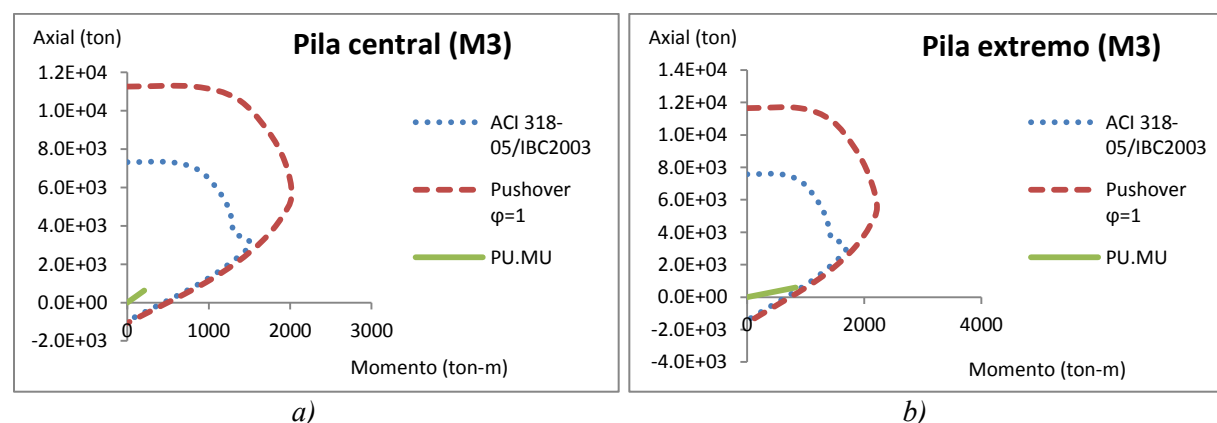


Figura.B.2.47 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M067 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo

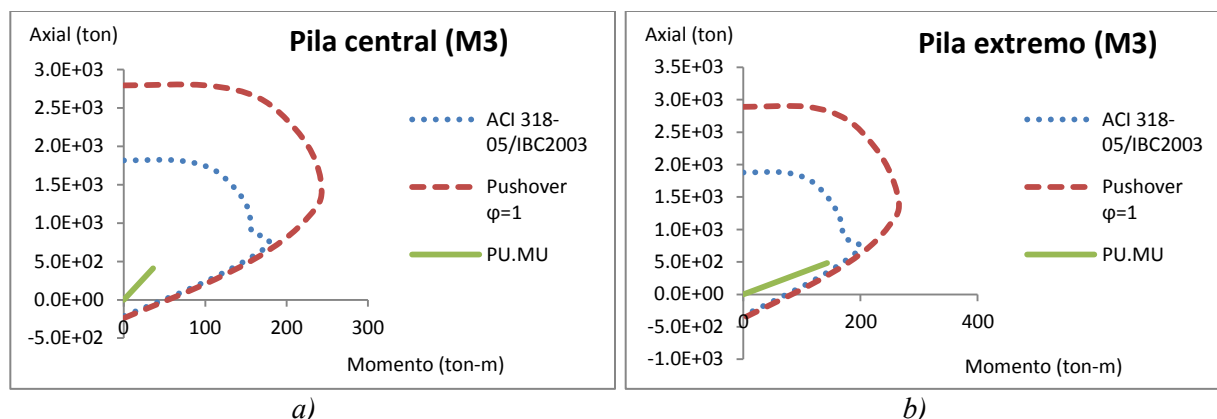


Figura.B.2.48 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M068 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo

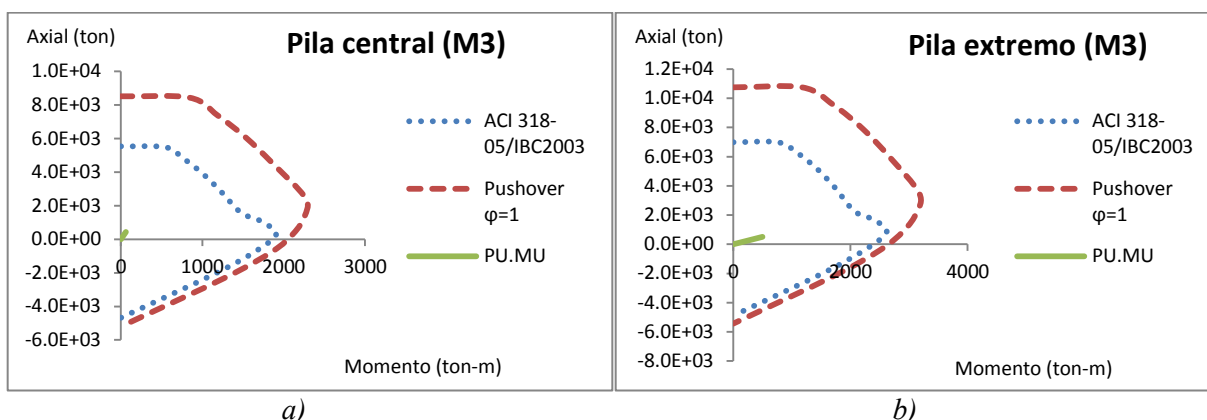


Figura.B.2.49 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M043 y M004 para: a) pila central y b) pila extremo

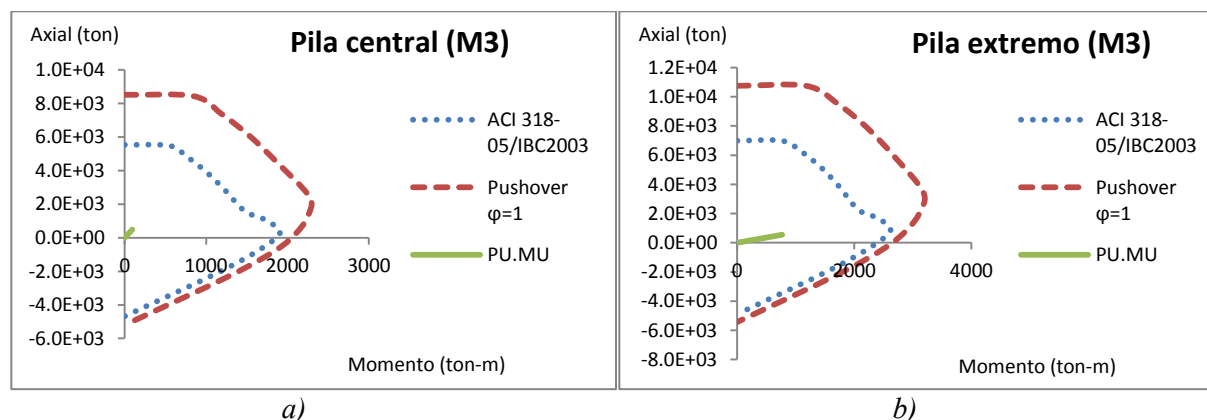


Figura.B.2.50 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M044 y M005 para: a) pila central y b) pila extremo

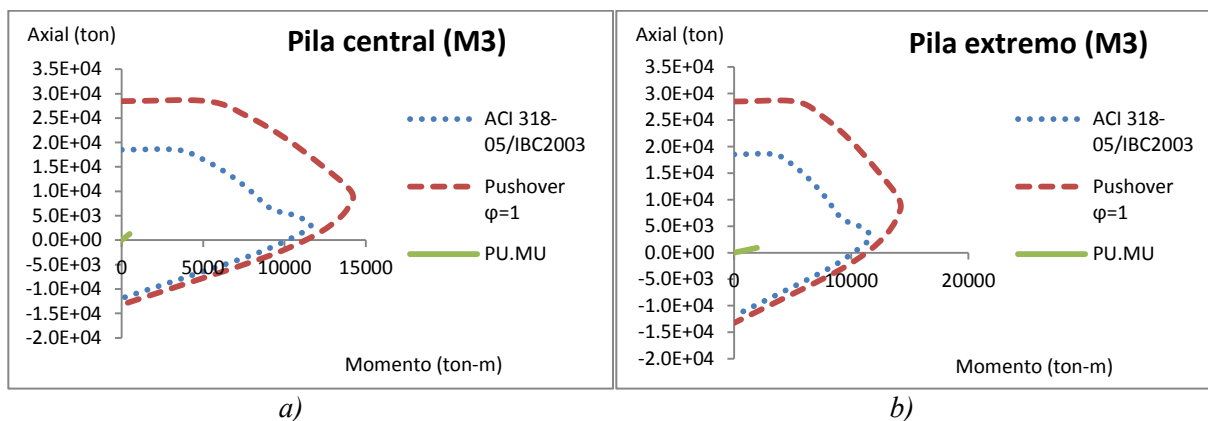


Figura.B.2.51 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M045 y M006 para: a) pila central y b) pila extremo

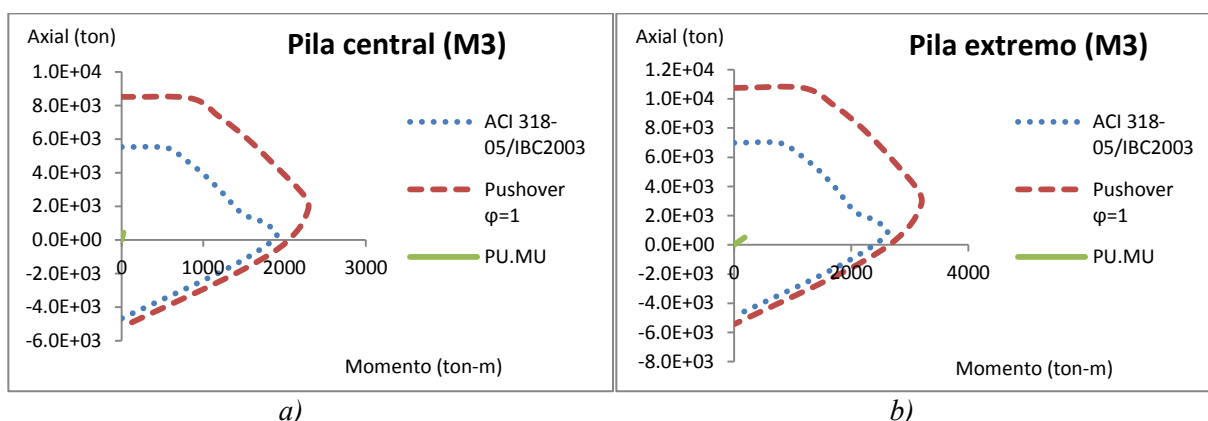


Figura.B.2.52 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M046 y M007 para: a) pila central y b) pila extremo

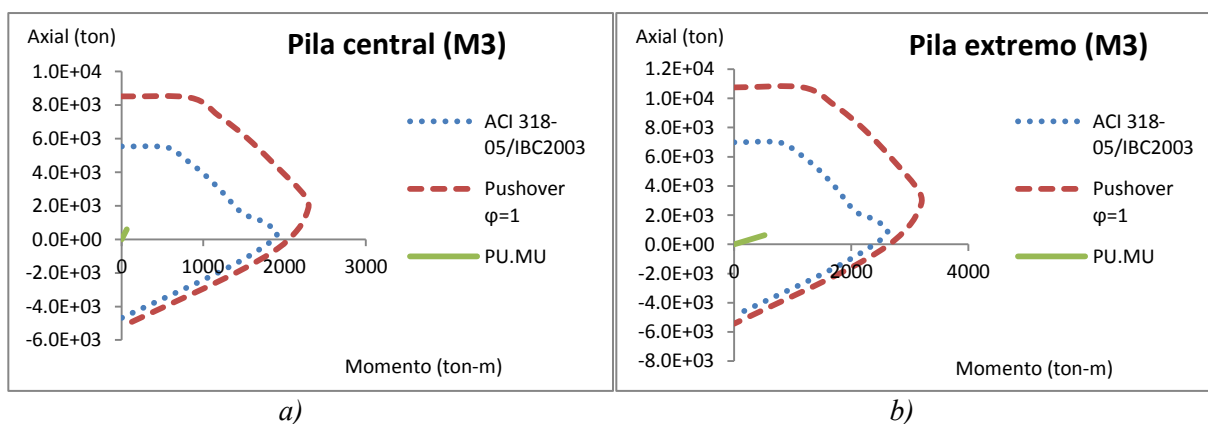


Figura.B.2.53 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M047 y M008 para: a) pila central y b) pila extremo

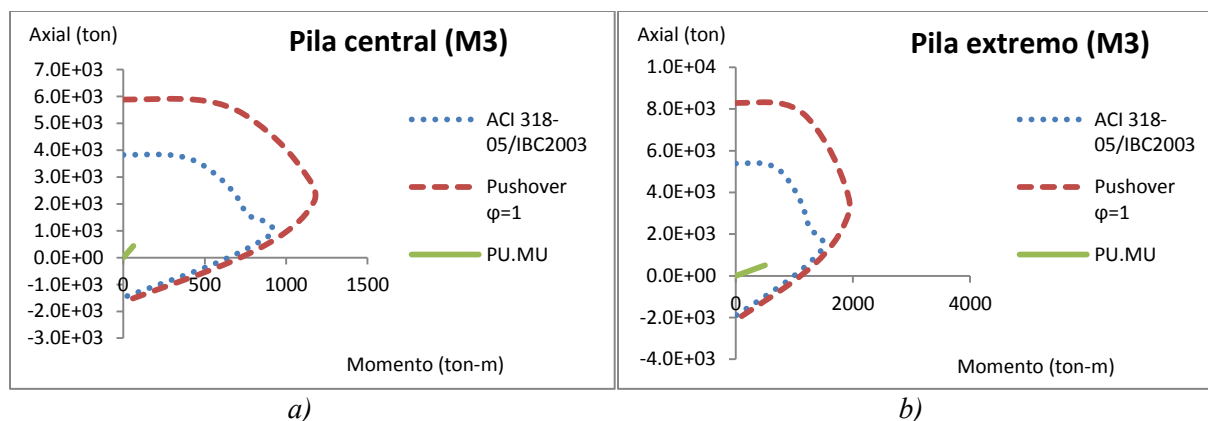


Figura.B.2.54 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M056 y M017 para: a) pila central y b) pila extremo

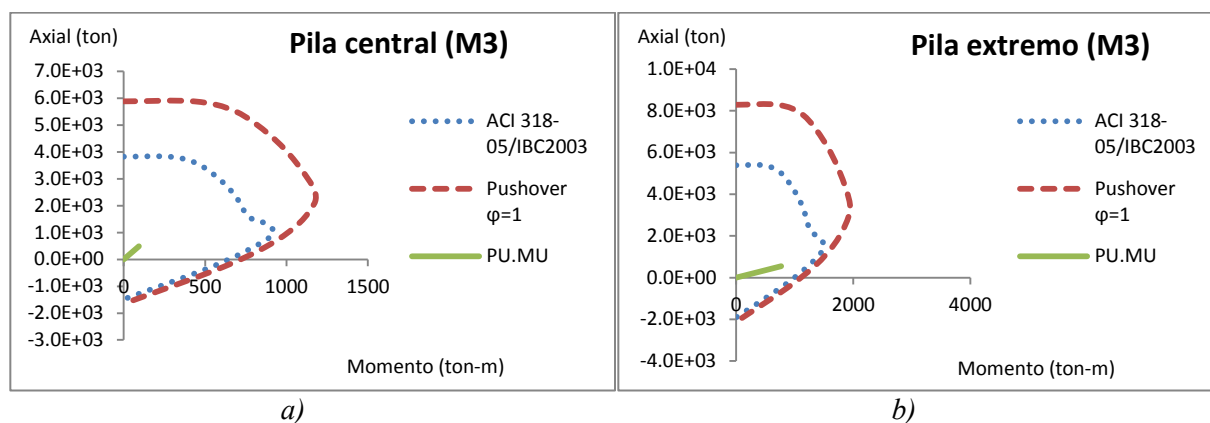


Figura.B.2.55 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M057 y M018 para: a) pila central y b) pila extremo

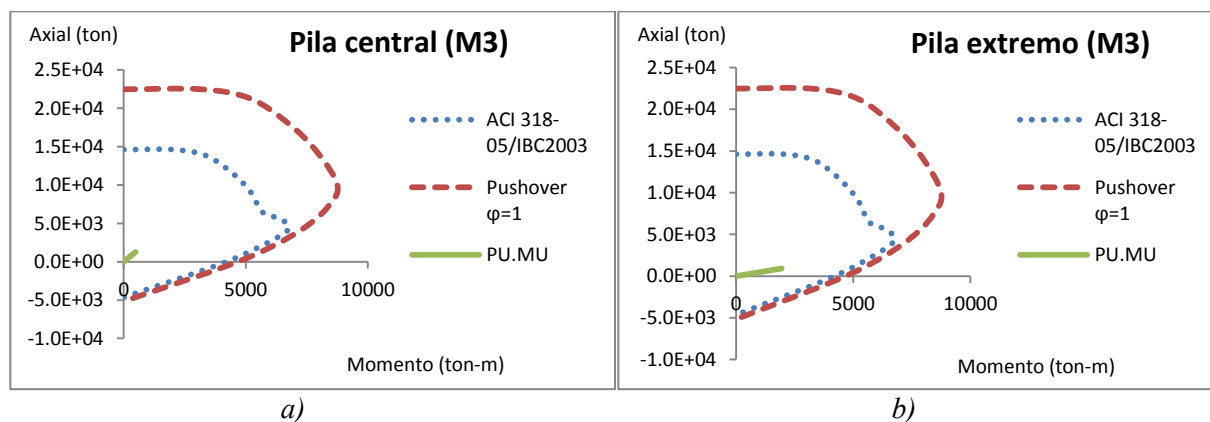


Figura.B.2.56 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M058 y M019 para: a) pila central y b) pila extremo

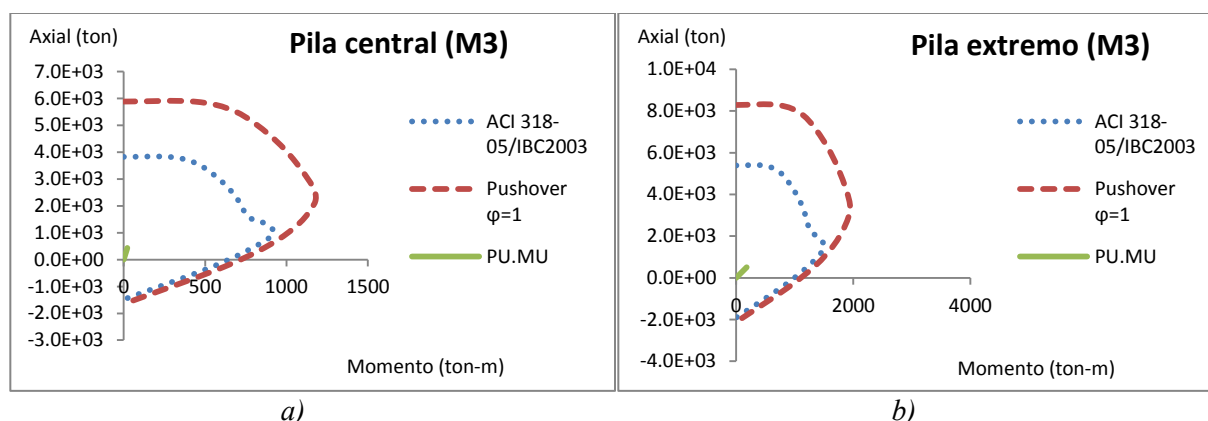


Figura.B.2.57 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M059 y M020 para: a) pila central y b) pila extremo

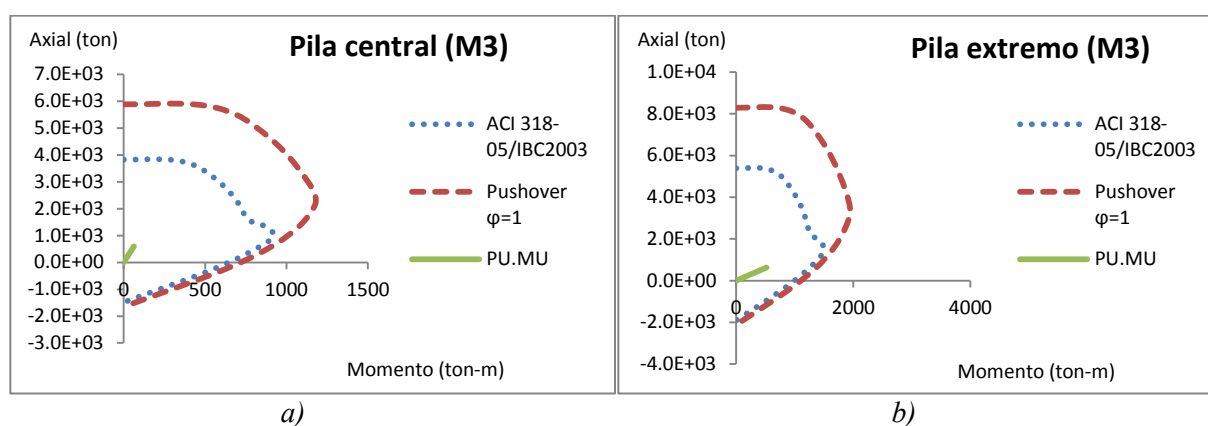


Figura.B.2.58 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M060 y M021 para: a) pila central y b) pila extremo

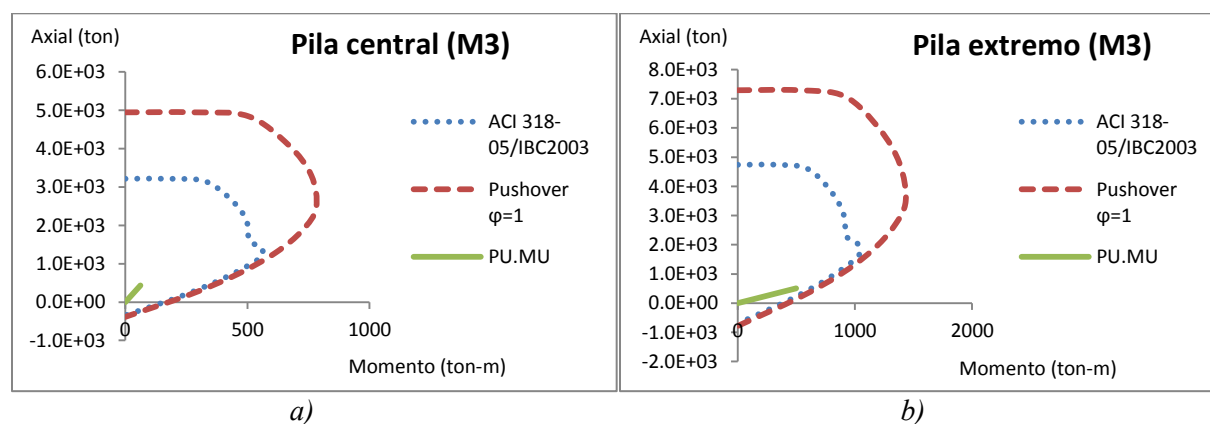


Figura.B.2.59 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M069 y M030 para: a) pila central y b) pila extremo

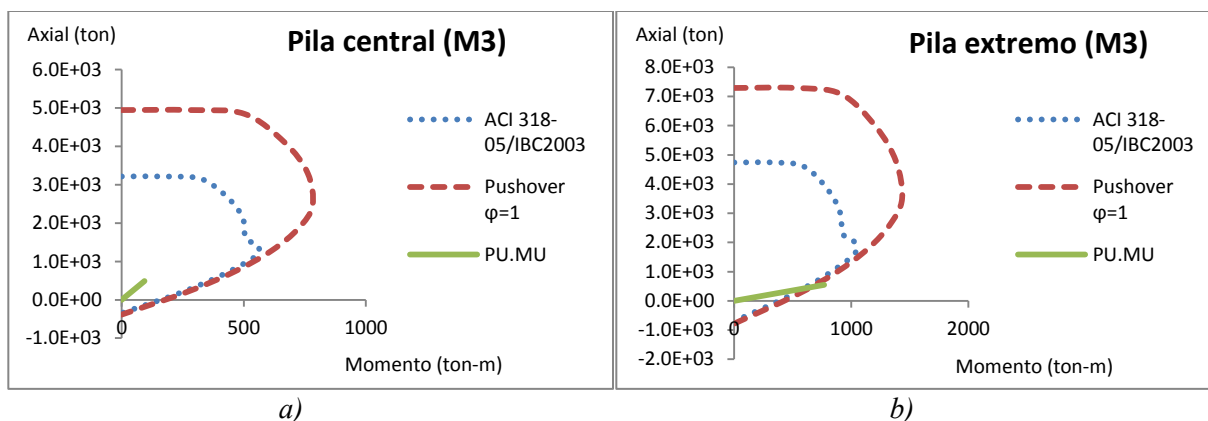


Figura.B.2.60 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M070 y M031 para: a) pila central y b) pila extremo

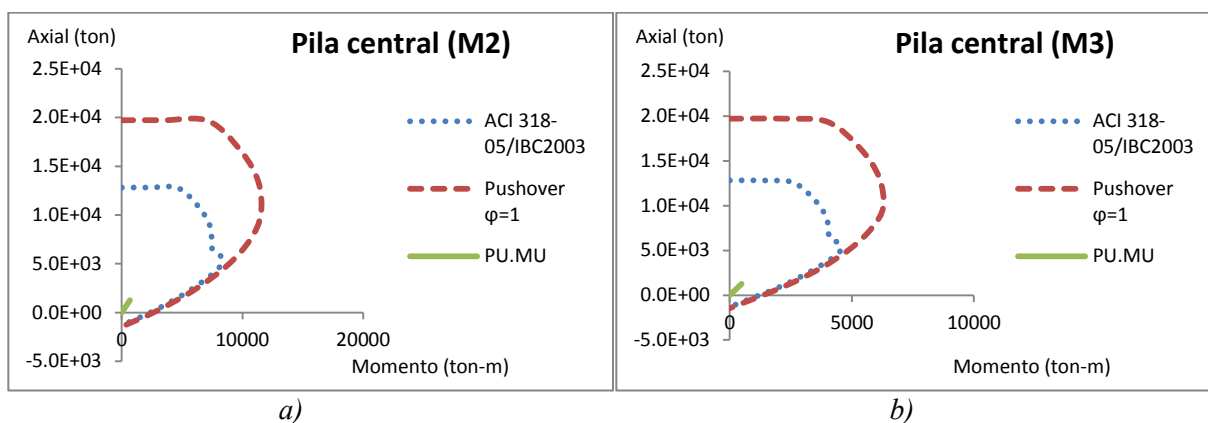


Figura.B.2.61 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M071 y M032 para: a) pila central y b) pila extremo

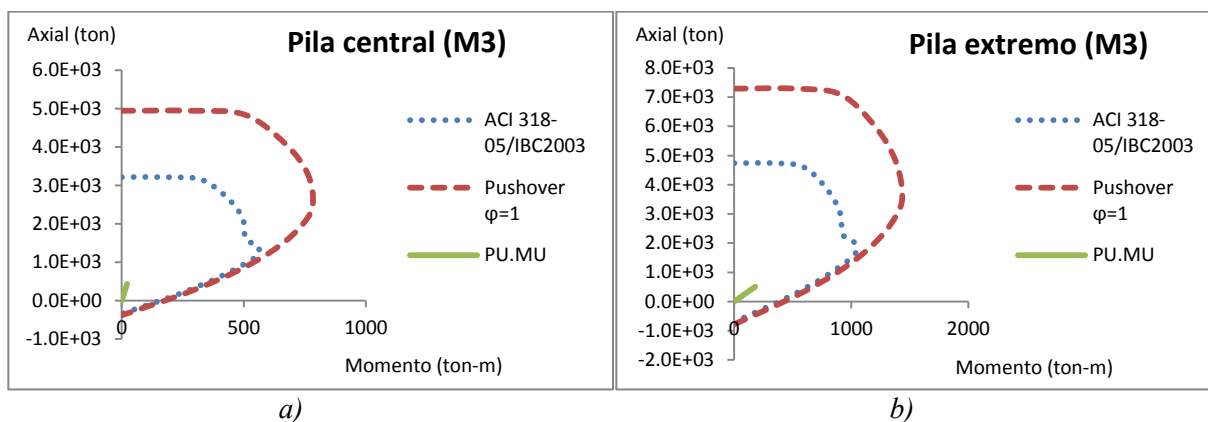


Figura.B.2.62 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M072 y M033 para: a) pila central y b) pila extremo

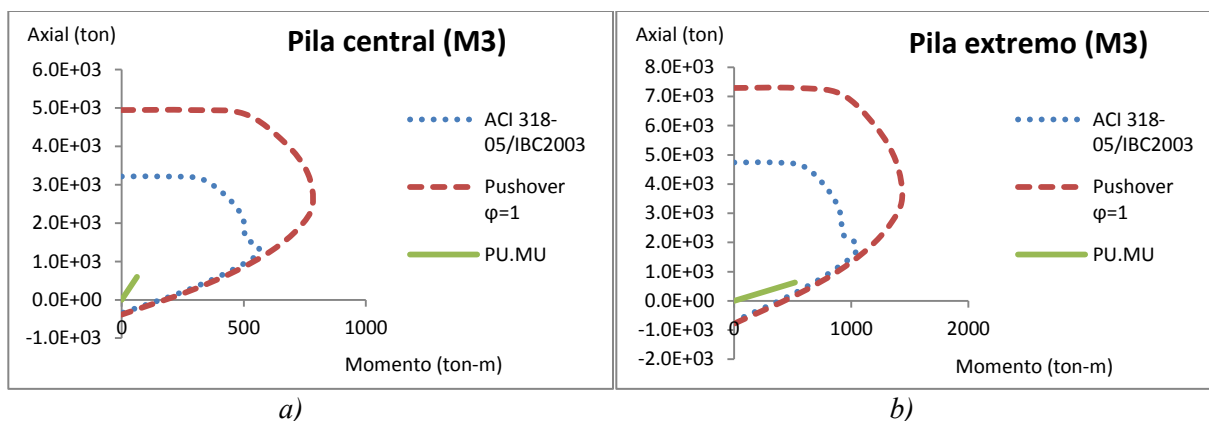


Figura.B.2.63 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M073 y M034 para: a) pila central y b) pila extremo

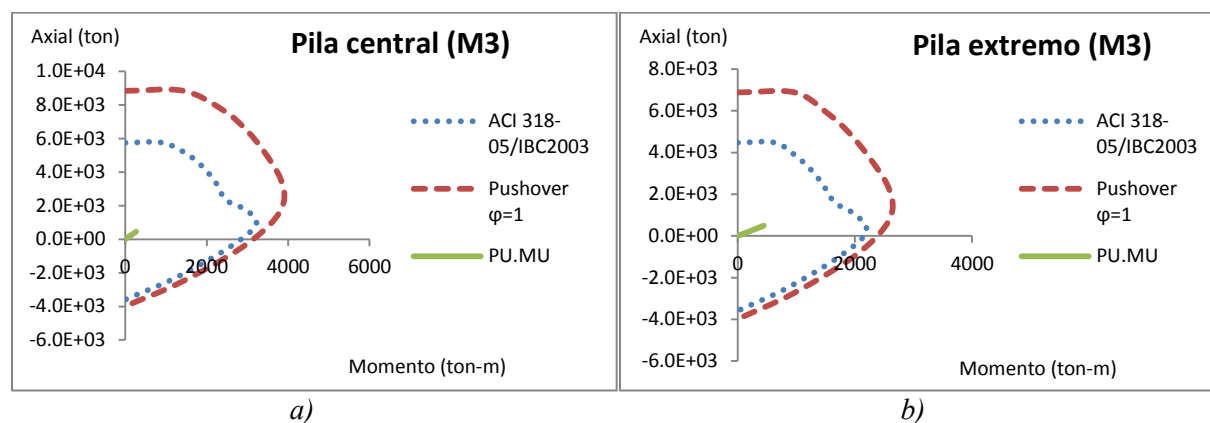


Figura.B.2.64 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M048 y M009 para: a) pila central y b) pila extremo

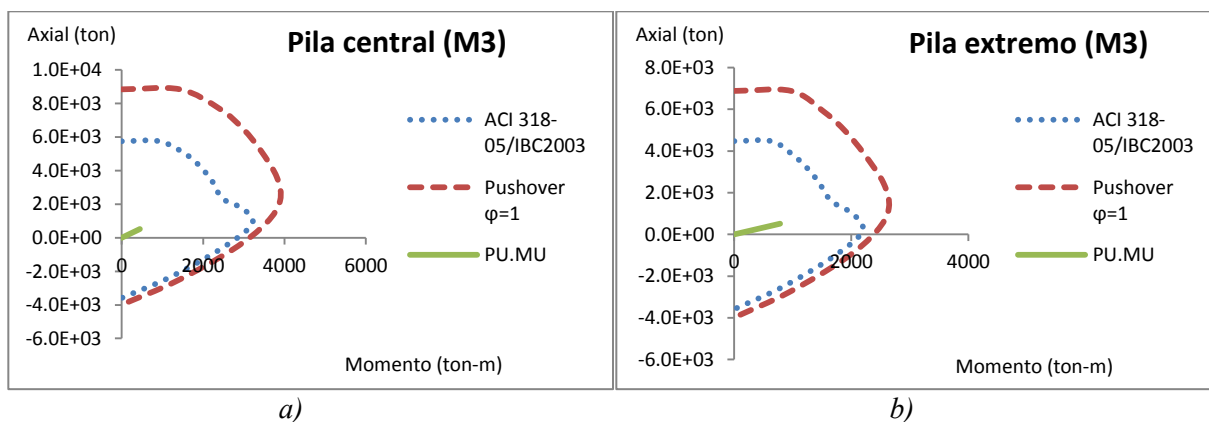


Figura.B.2.65 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M049 y M010 para: a) pila central y b) pila extremo

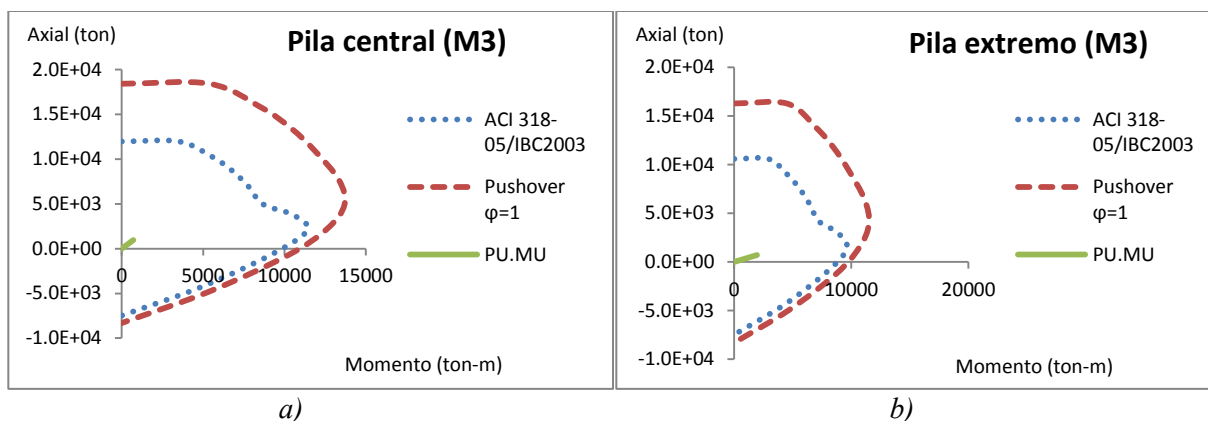


Figura.B.2.66 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M050 y M011 para: a) pila central y b) pila extremo

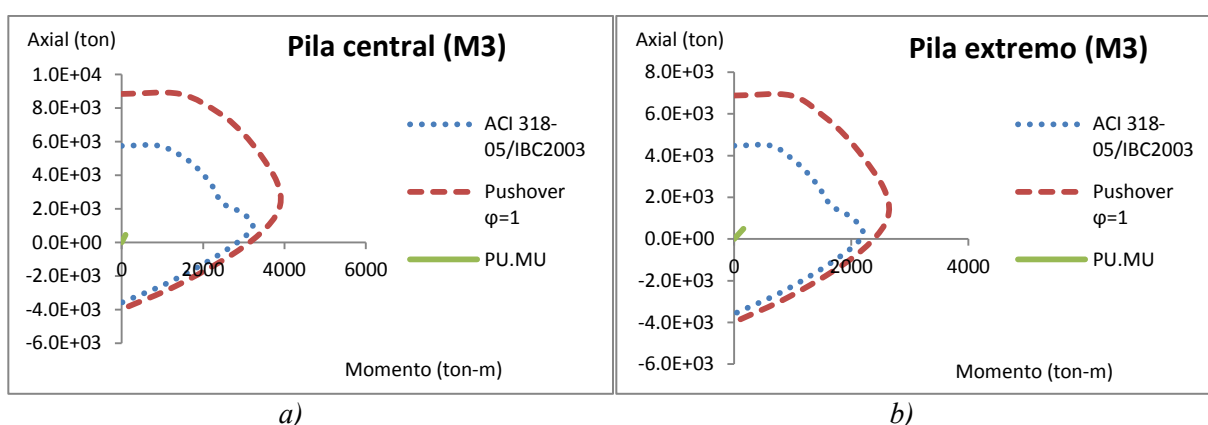


Figura.B.2.67 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M051 y M012 para: a) pila central y b) pila extremo

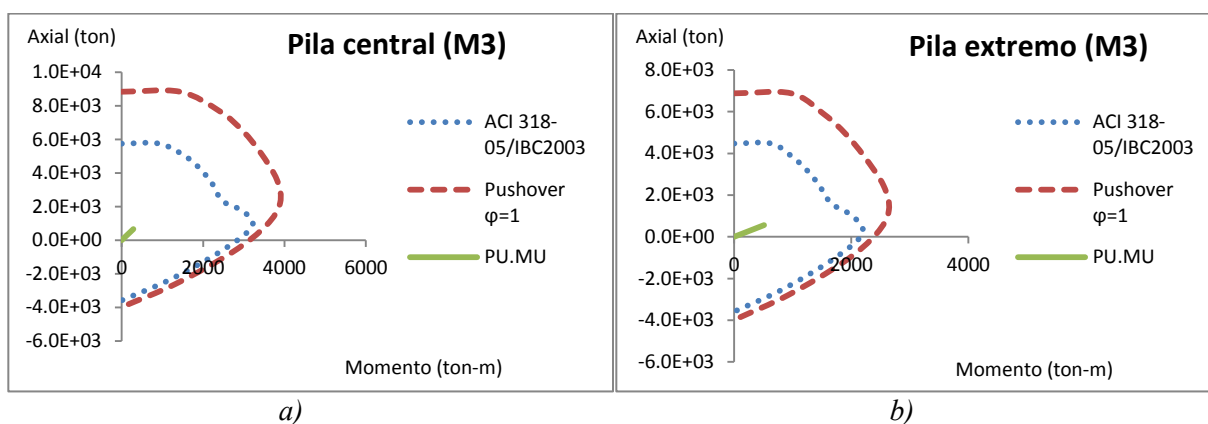


Figura.B.2.68 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M052 y M013 para: a) pila central y b) pila extremo

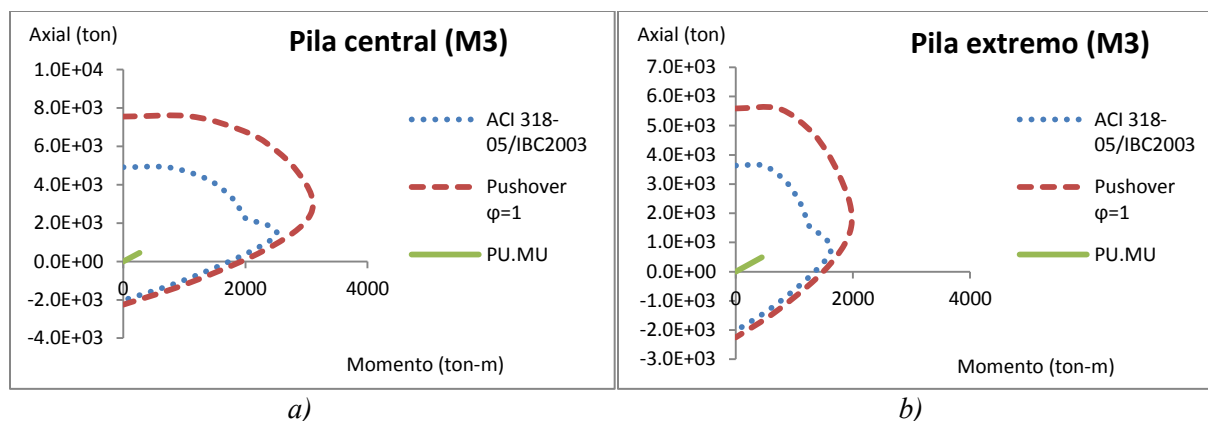


Figura.B.2.69 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M061 y M022 para: a) pila central y b) pila extremo

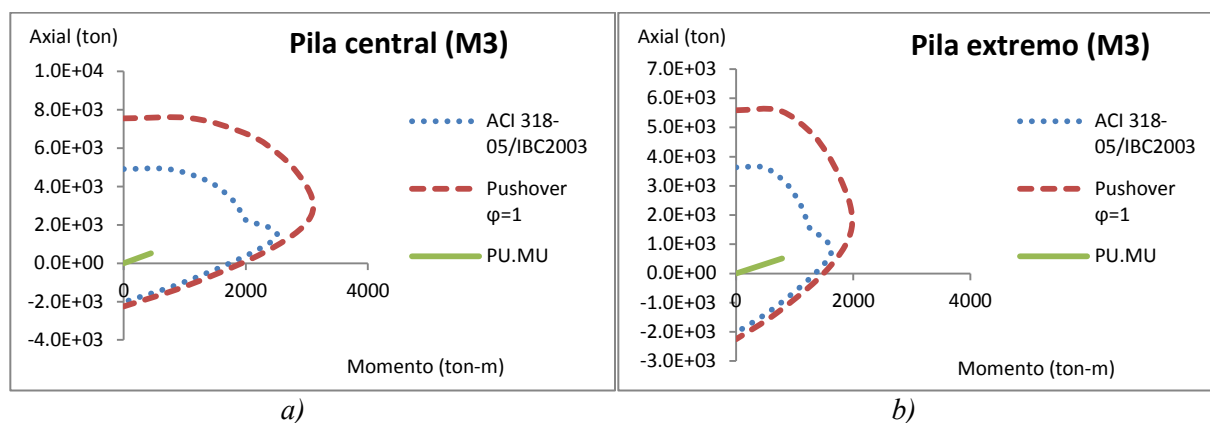


Figura.B.2.70 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M062 y M023 para: a) pila central y b) pila extremo

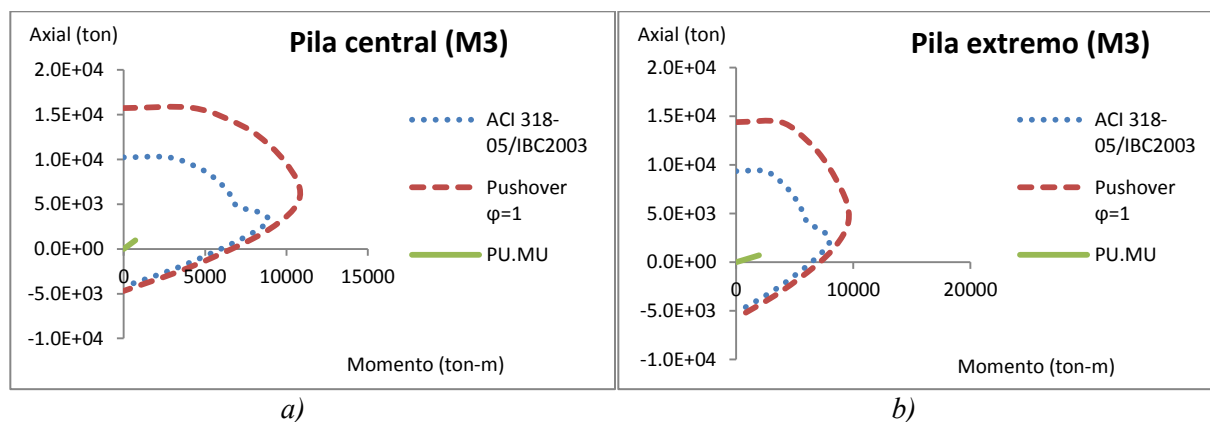


Figura.B.2.71 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M063 y M024 para: a) pila central y b) pila extremo

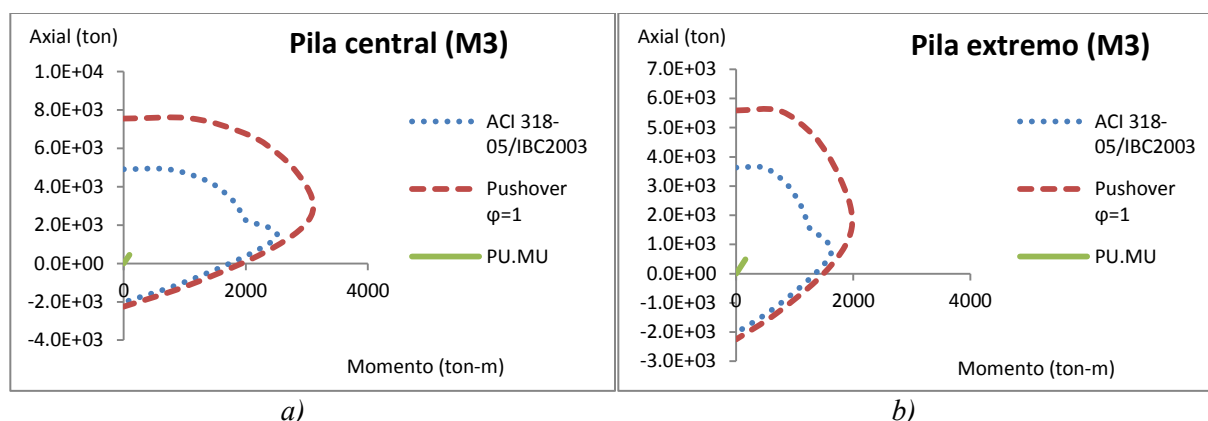


Figura.B.2.72 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M064 y M025 para: a) pila central y b) pila extremo

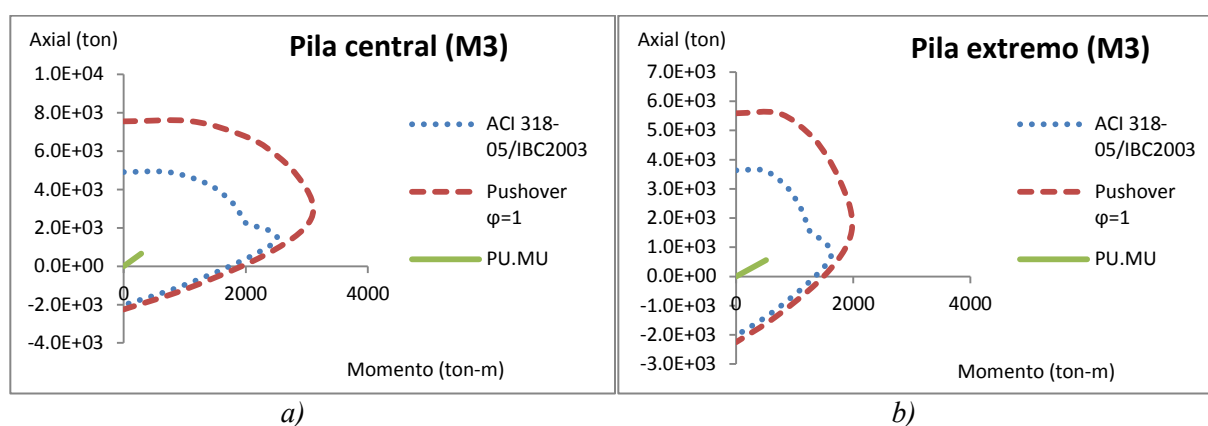


Figura.B.2.73 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M065 y M026 para: a) pila central y b) pila extremo

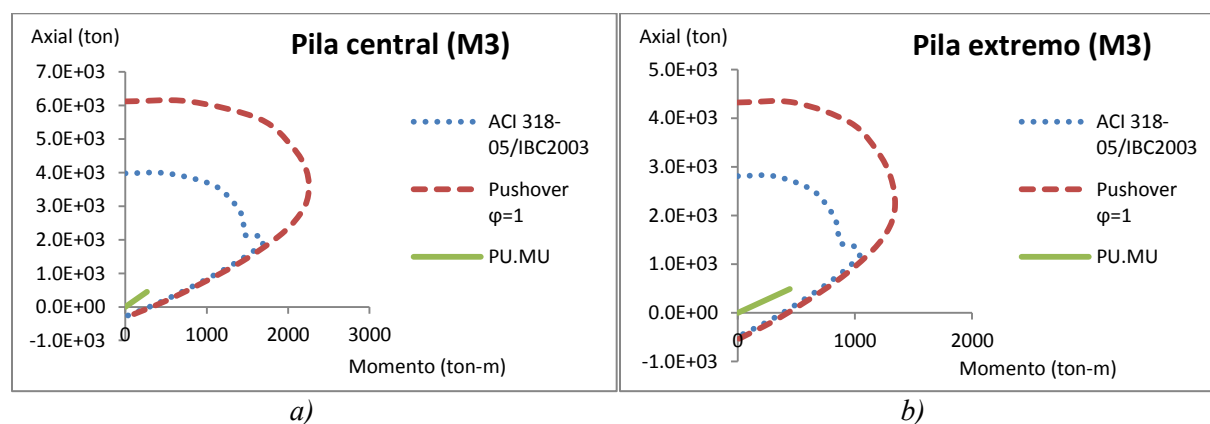


Figura.B.2.74 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M074 y M035 para: a) pila central y b) pila extremo

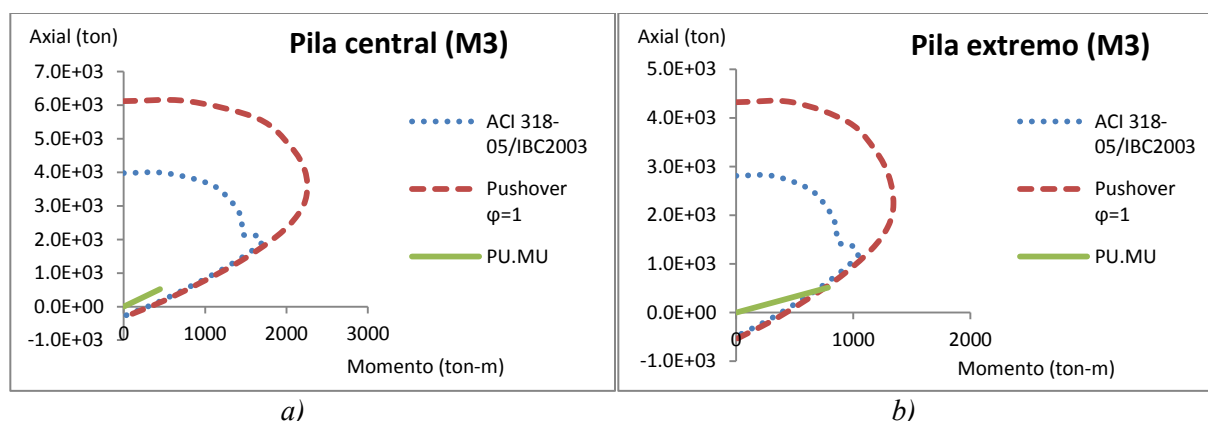


Figura.B.2.75 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M075 y M036 para: a) pila central y b) pila extremo

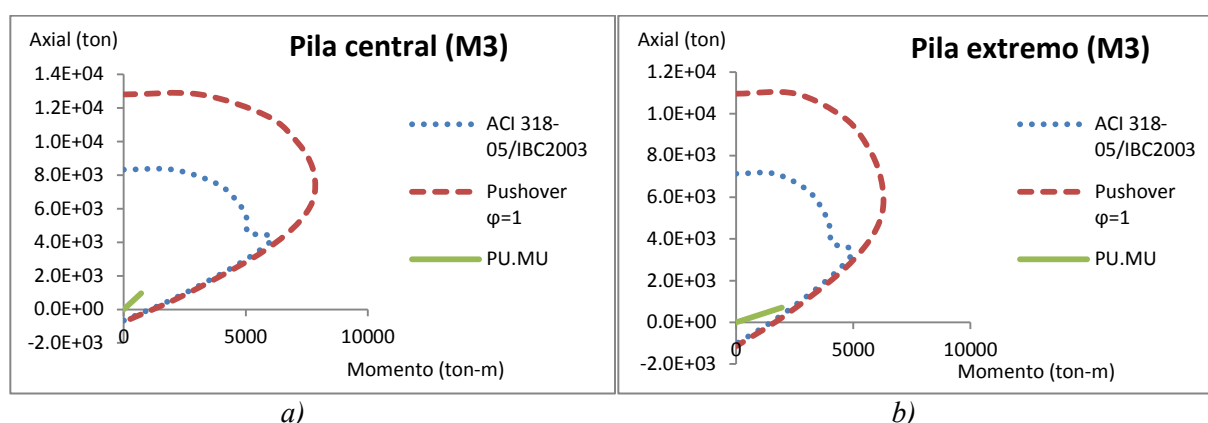


Figura.B.2.76 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M076 y M037 para: a) pila central y b) pila extremo

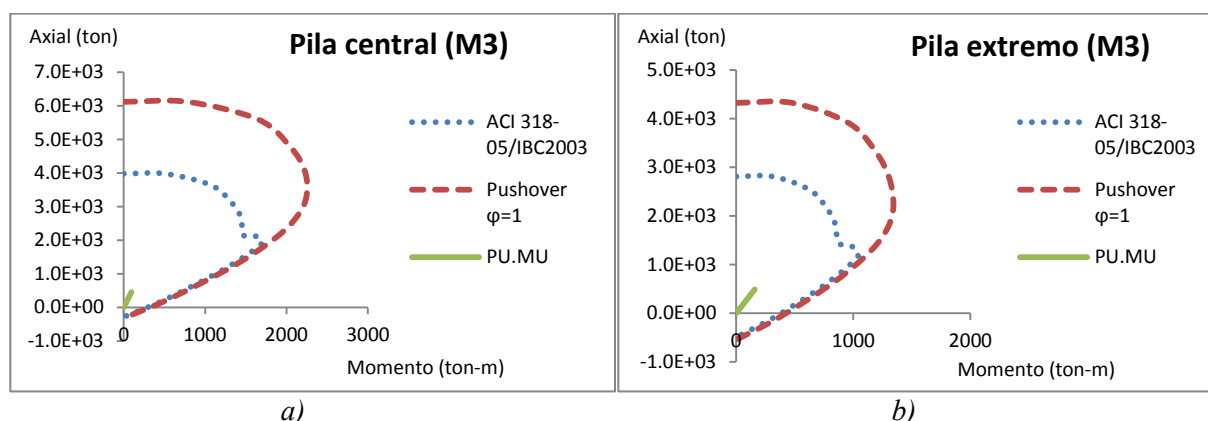


Figura.B.2.77 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M077 y M038 para: a) pila central y b) pila extremo

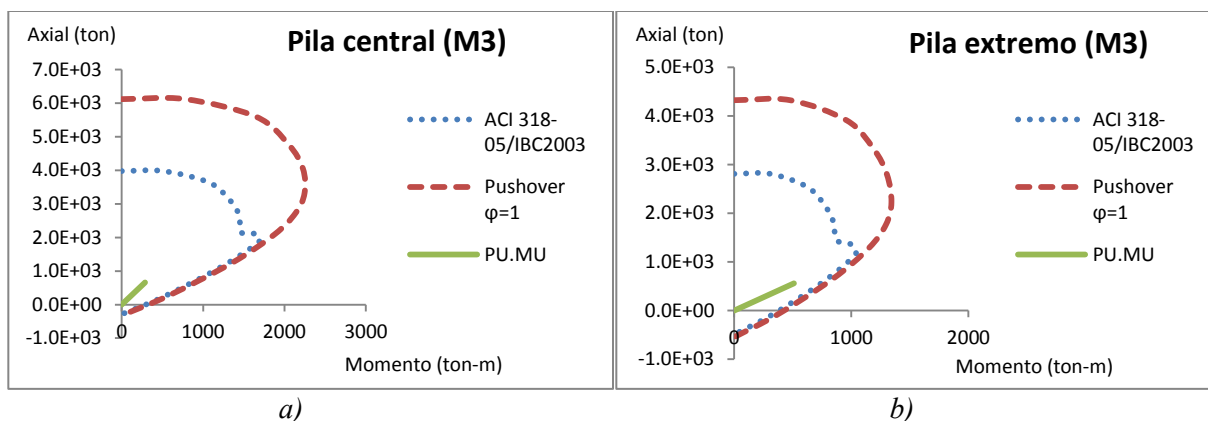


Figura.B.2.78 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M078 y M039 para: a) pila central y b) pila extremo

B.3 Diagramas de interacción de las pilas de puente en dirección transversal

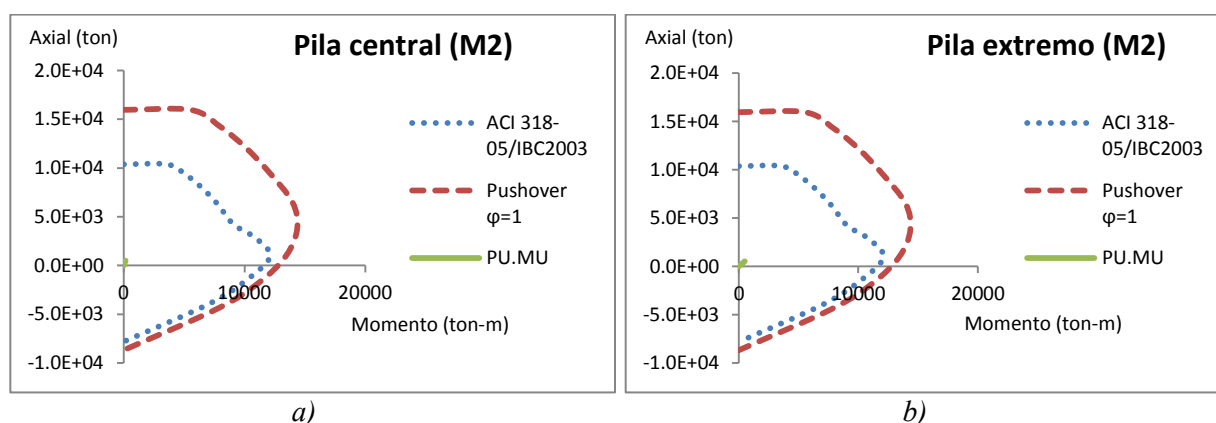


Figura.B.3.1 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M118 y M079 para: a) pila central y b) pila extremo

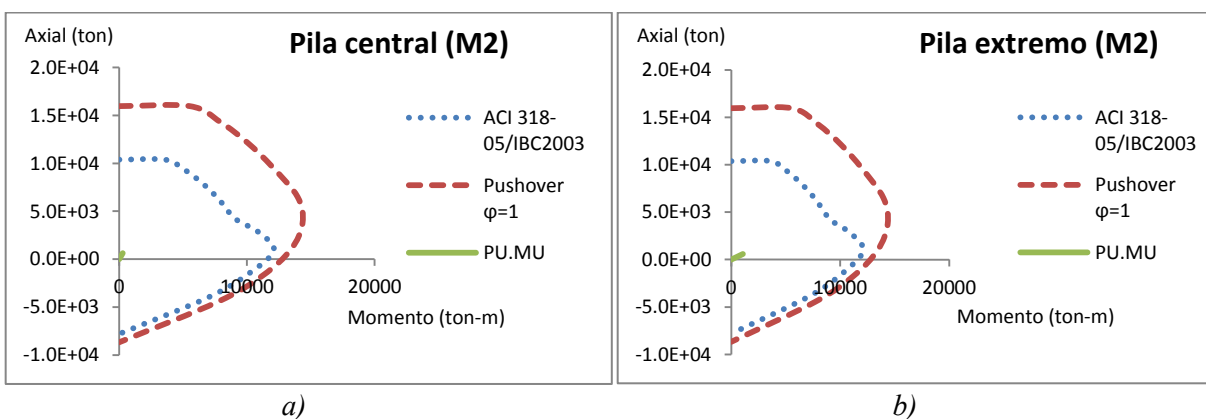


Figura.B.3.2 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M119 y M080 para: a) pila central y b) pila extremo

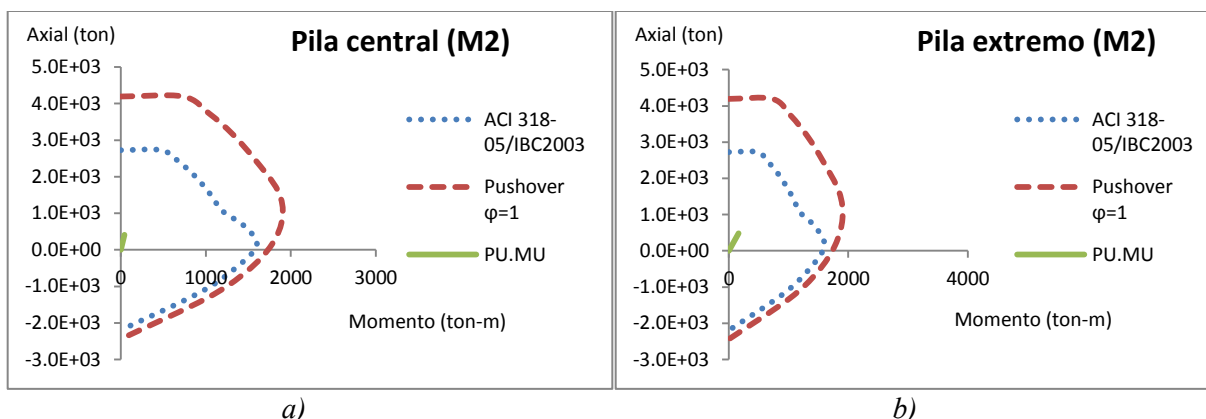


Figura.B.3.3 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M120 y M081 para: a) pila central y b) pila extremo

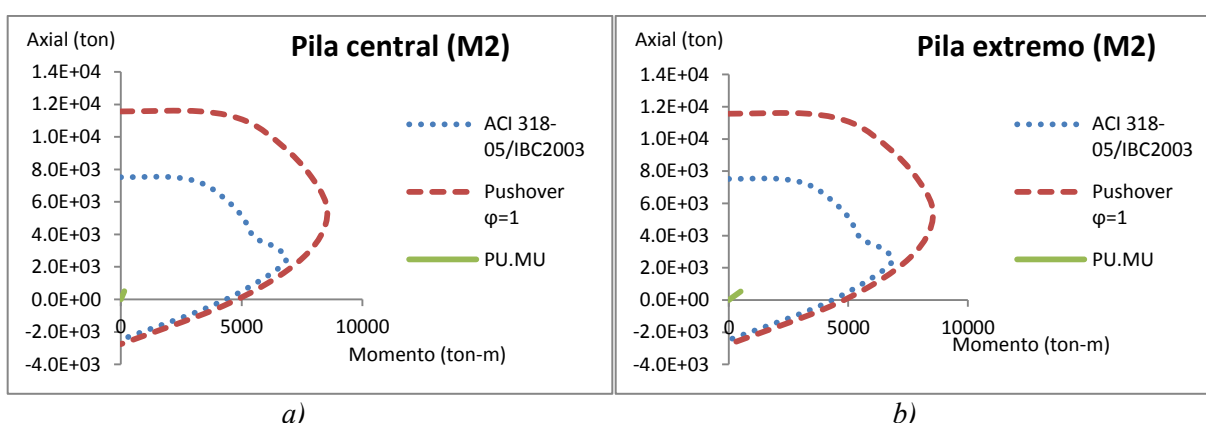


Figura.B.3.4 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M131, M092, M157, M170, M183 y M196 para: a) pila central y b) pila extremo

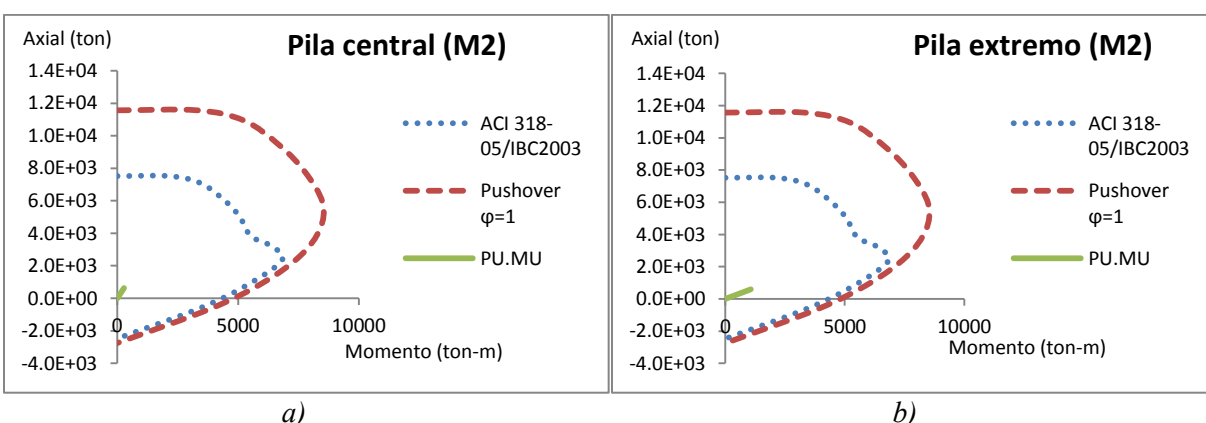


Figura.B.3.5 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M132, M093, M158, M171, M184 y M197 para: a) pila central y b) pila extremo

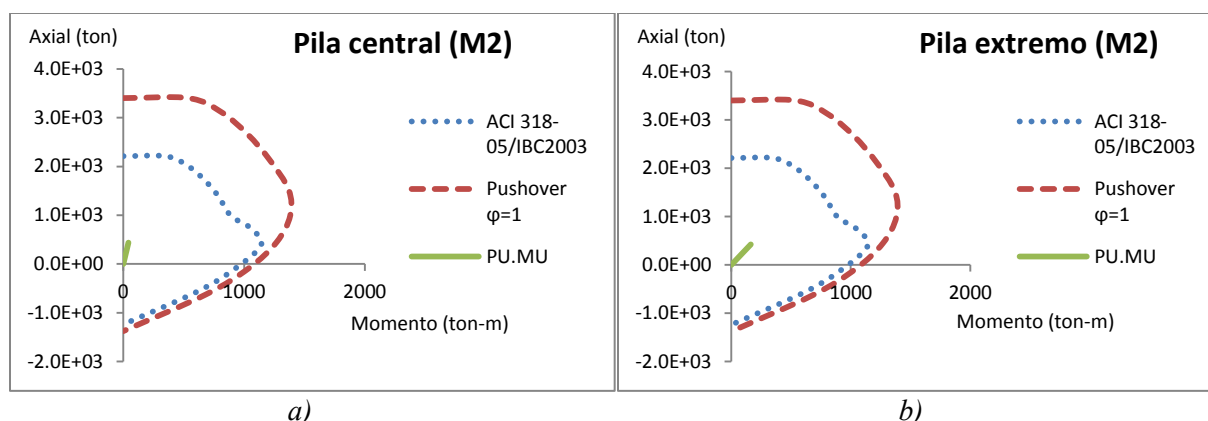


Figura.B.3.6 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M133, M094, M159, M172, M185 y M198 para: a) pila central y b) pila extremo

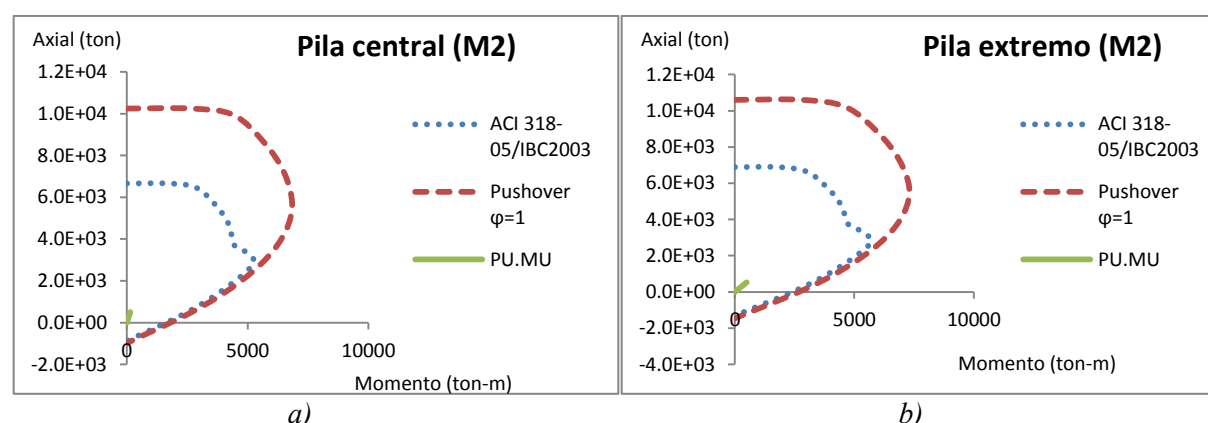


Figura.B.3.7 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M144 y M092 para: a) pila central y b) pila extremo

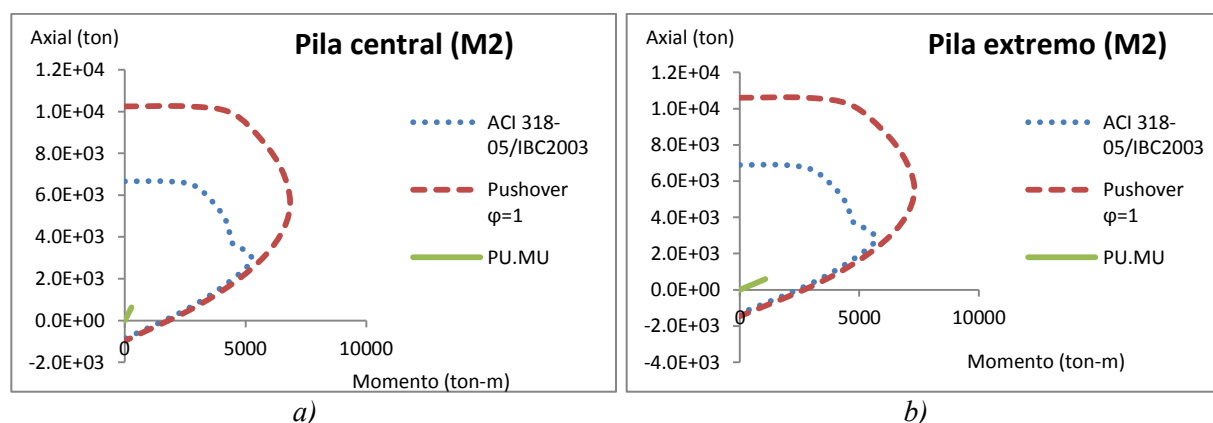


Figura.B.3.8 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M145 y M093 para: a) pila central y b) pila extremo

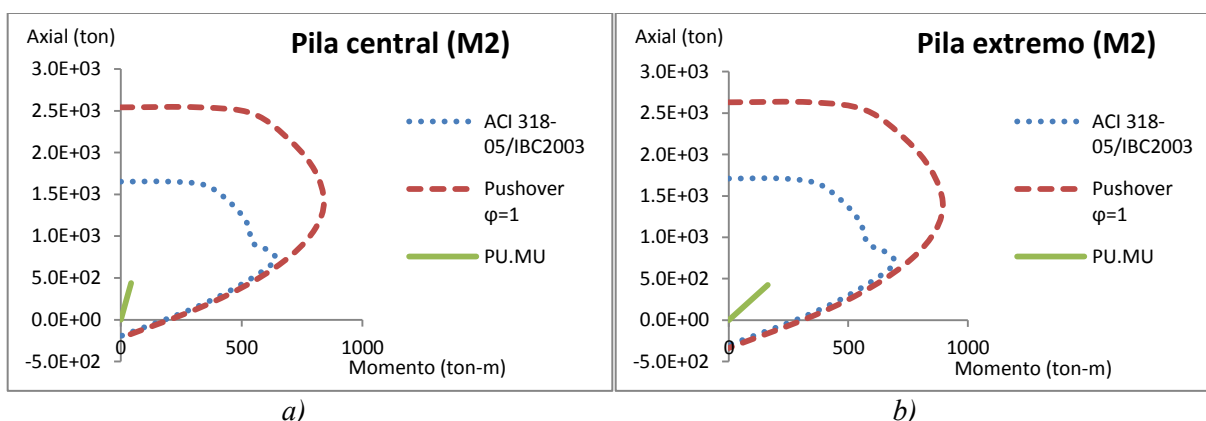


Figura.B.3.9 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M146 y M094 para: a) pila central y b) pila extremo

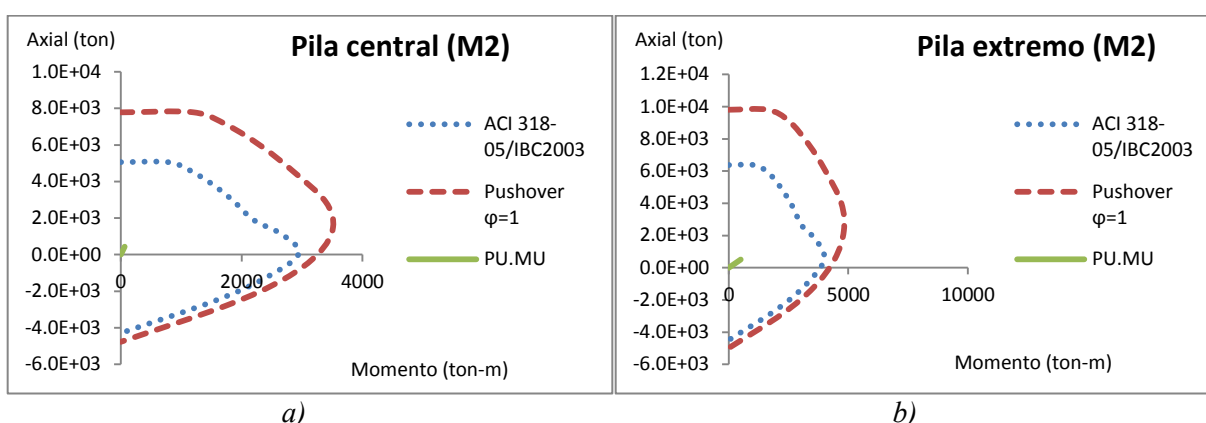


Figura.B.3.10 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M121 y M082 para: a) pila central y b) pila extremo

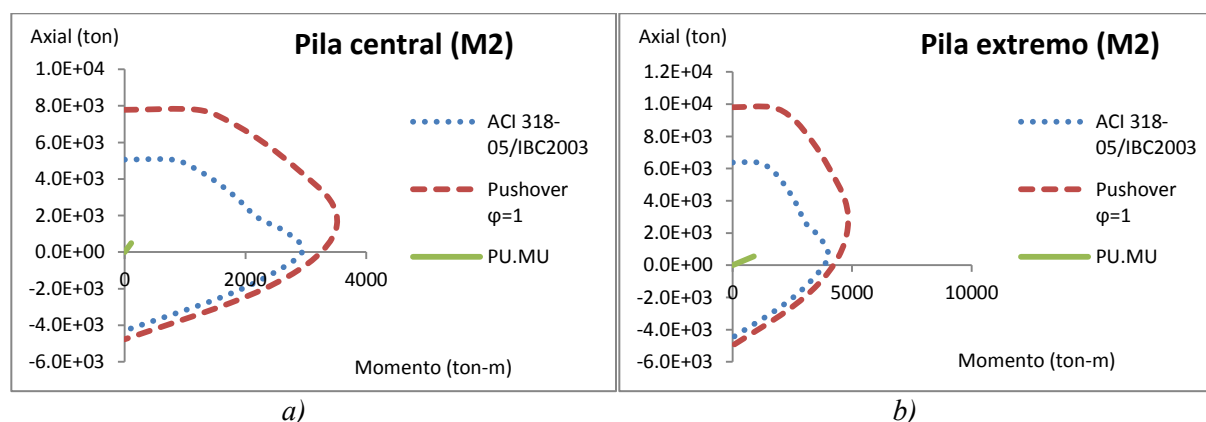


Figura.B.3.11 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M122 y M083 para: a) pila central y b) pila extremo

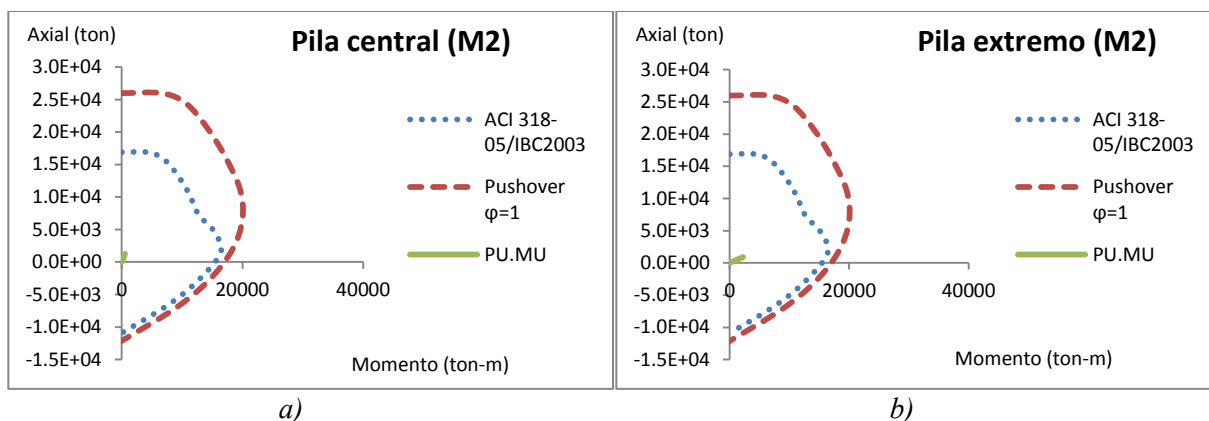


Figura.B.3.12 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M123 y M084 para: a) pila central y b) pila extremo

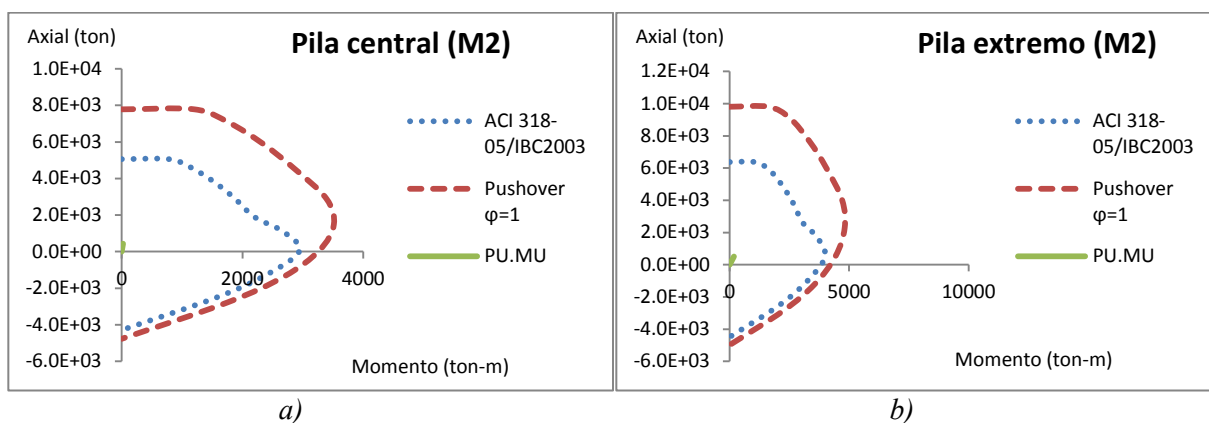


Figura.B.3.13 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M124 y M085 para: a) pila central y b) pila extremo

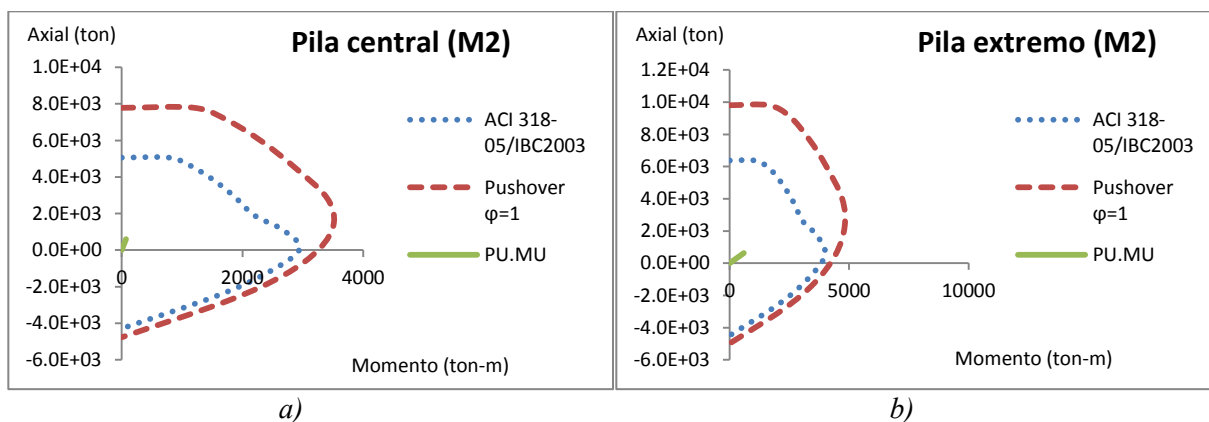


Figura.B.3.14 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M125 y M086 para: a) pila central y b) pila extremo

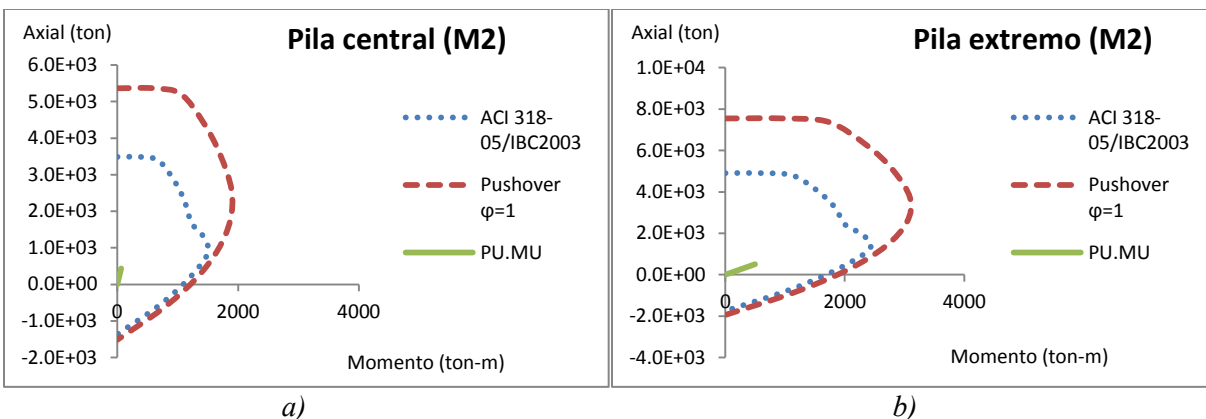


Figura.B.3.15 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M134, M095, M160, M173, M186 y M199 para: a) pila central y b) pila extremo

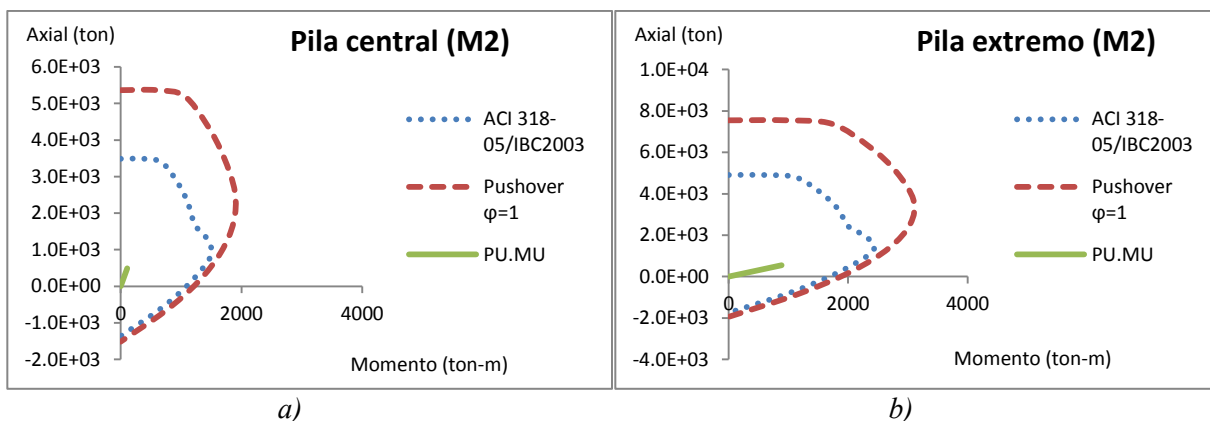


Figura.B.3.16 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M135, M096, M161, M174, M187 y M174 para: a) pila central y b) pila extremo

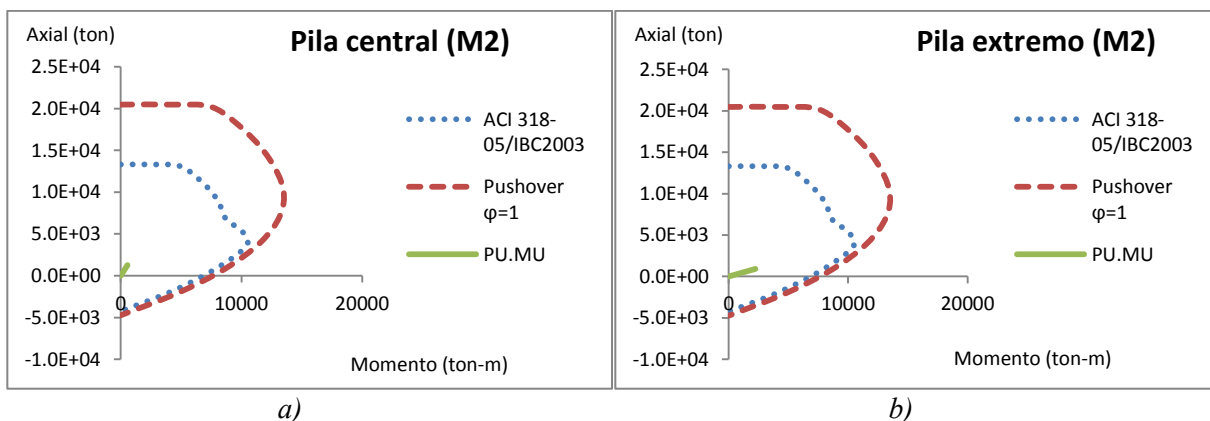


Figura.B.3.17 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M136, M097, M162, M175, M188 y M175 para: a) pila central y b) pila extremo

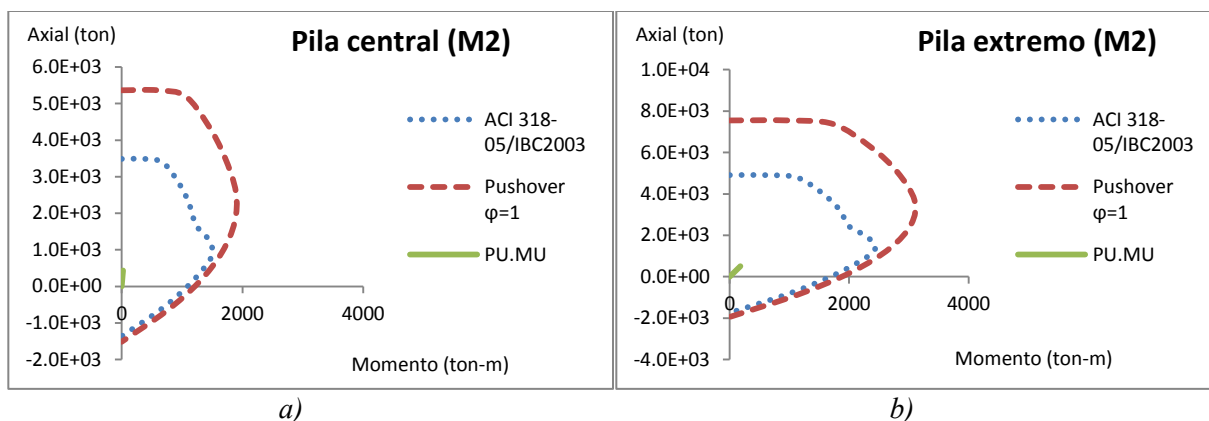


Figura.B.3.18 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M137, M098, M163, M176, M189 y M202 para: a) pila central y b) pila extremo

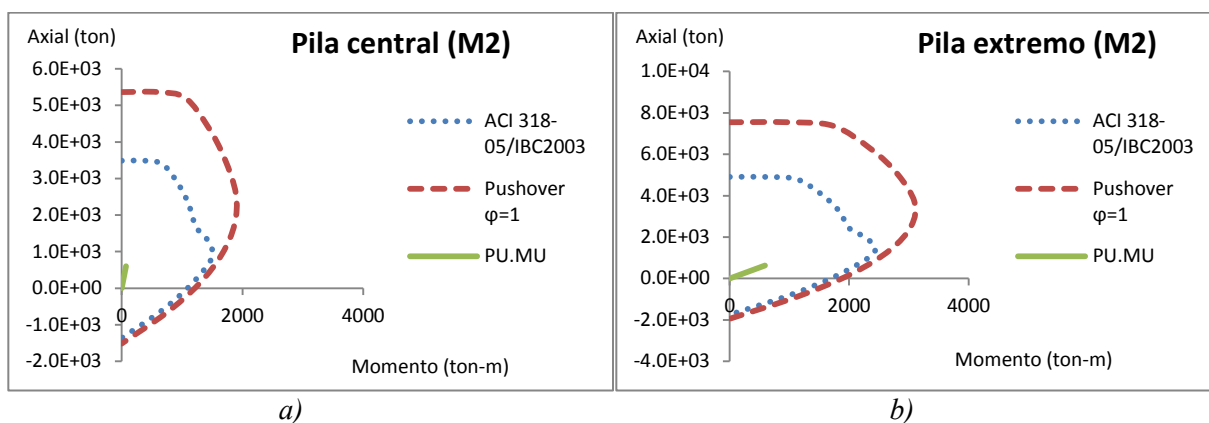


Figura.B.3.19 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M138, M099, M164, M177, M190 y M203 para: a) pila central y b) pila extremo

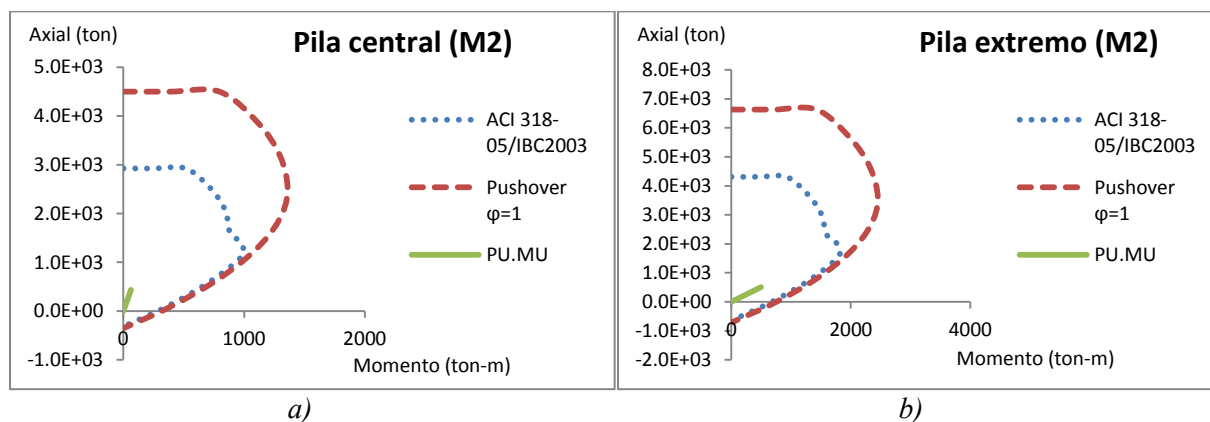


Figura.B.3.20 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M147 y M108 para: a) pila central y b) pila extremo

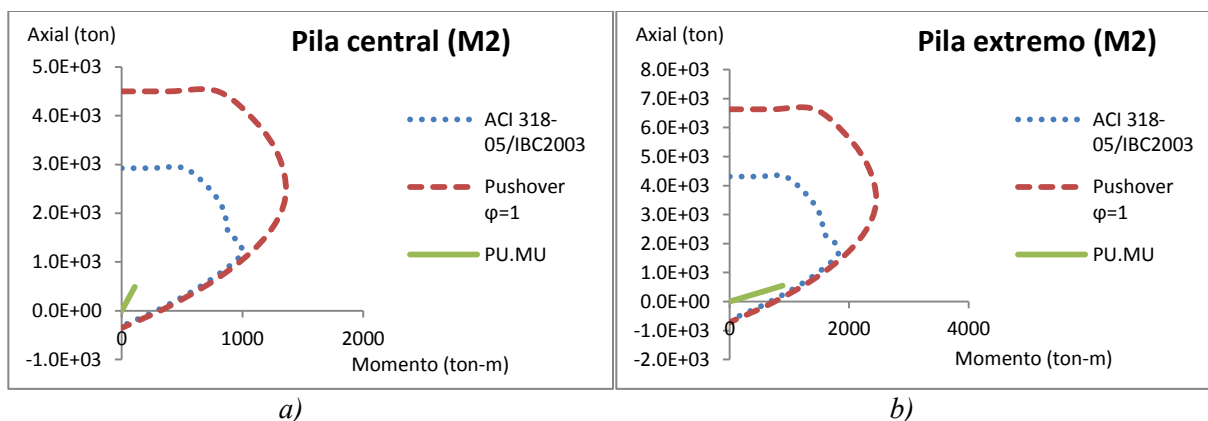


Figura.B.3.21 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M148 y M109 para: a) pila central y b) pila extremo

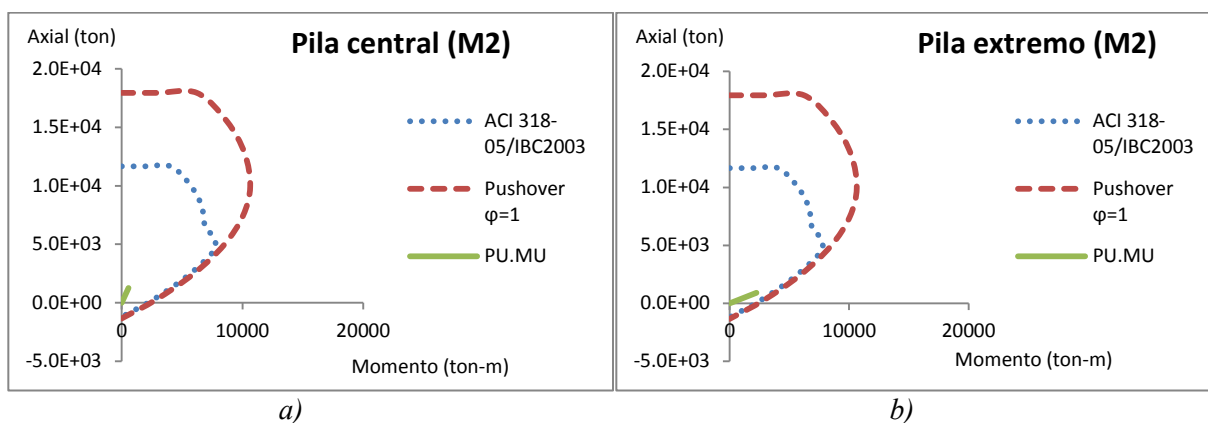


Figura.B.3.22 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M149 y M110 para: a) pila central y b) pila extremo

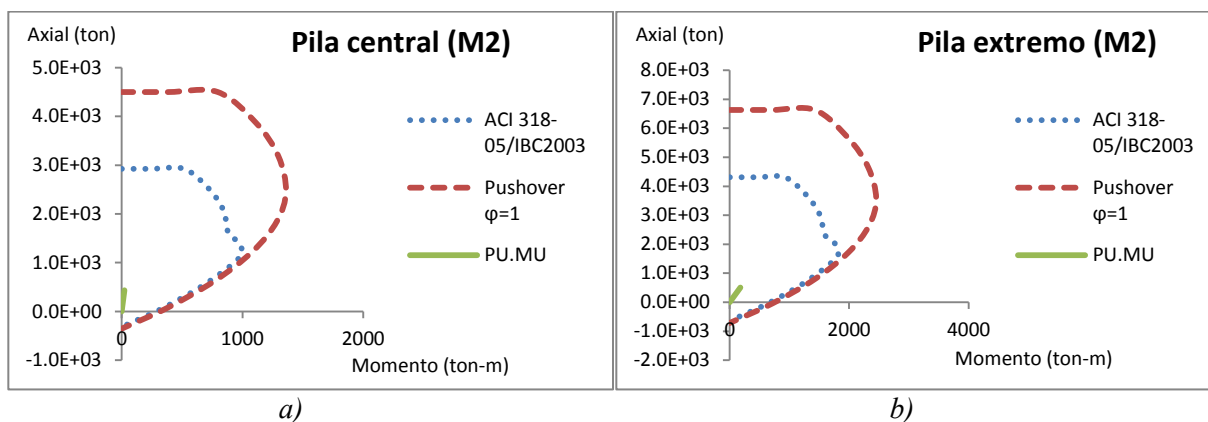


Figura.B.3.23 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M150 y M111 para: a) pila central y b) pila extremo

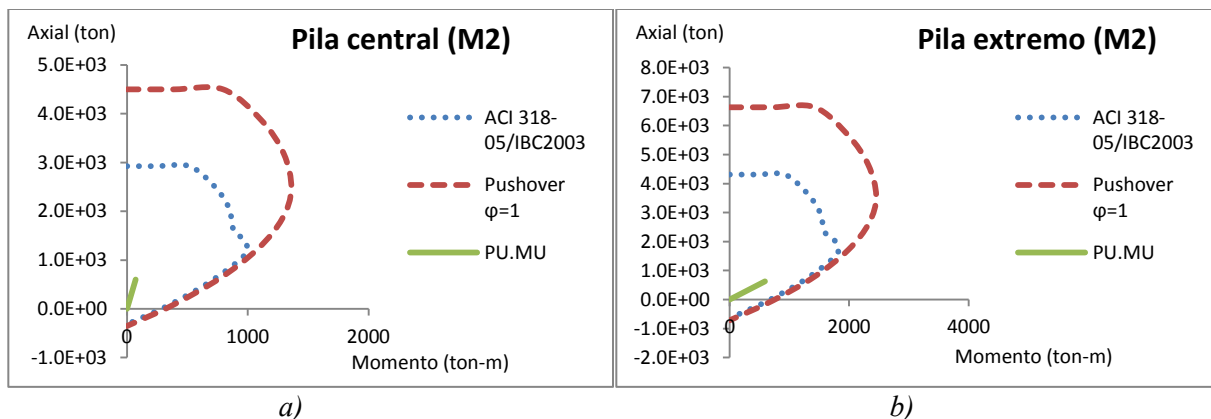


Figura.B.3.24 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M151 y M112 para: a) pila central y b) pila extremo

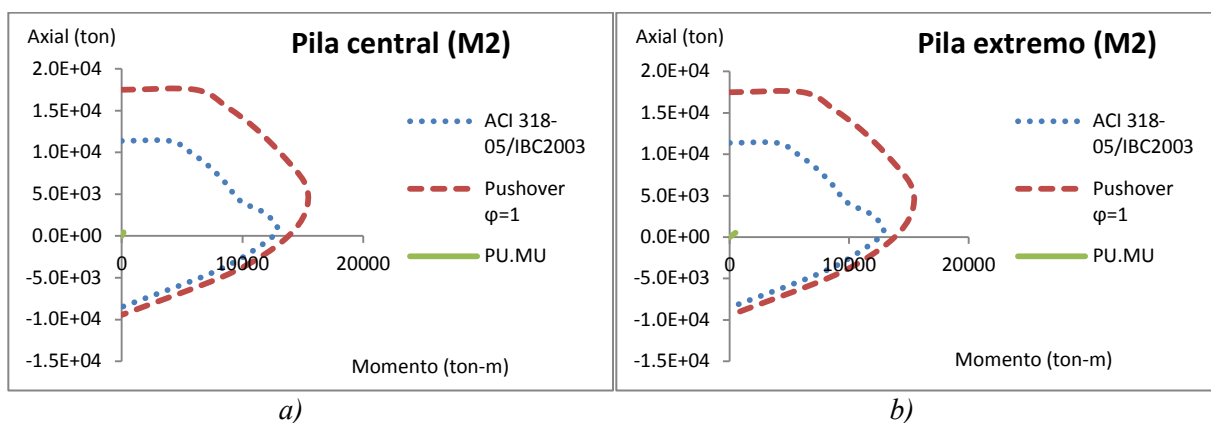


Figura.B.3.25 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M040 y M001 para: a) pila central y b) pila extremo

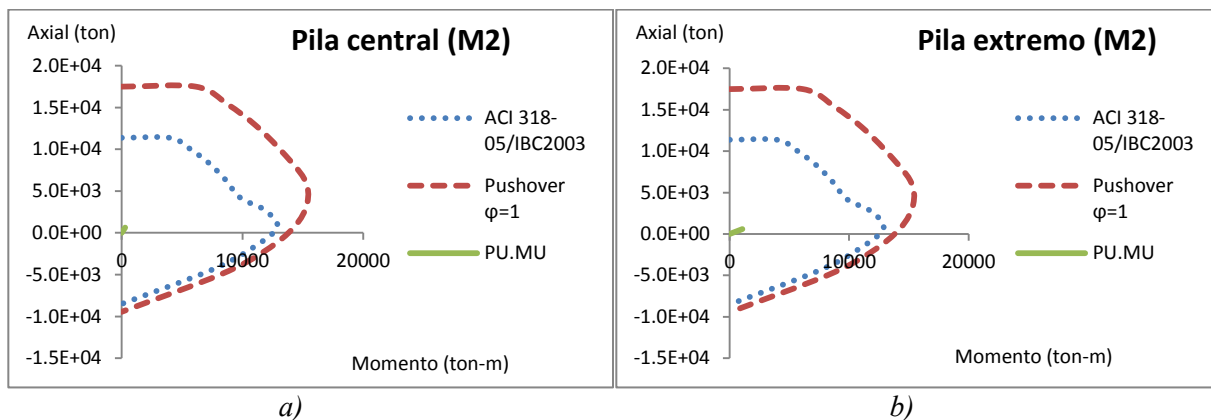


Figura.B.3.26 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M041 y M002 para: a) pila central y b) pila extremo

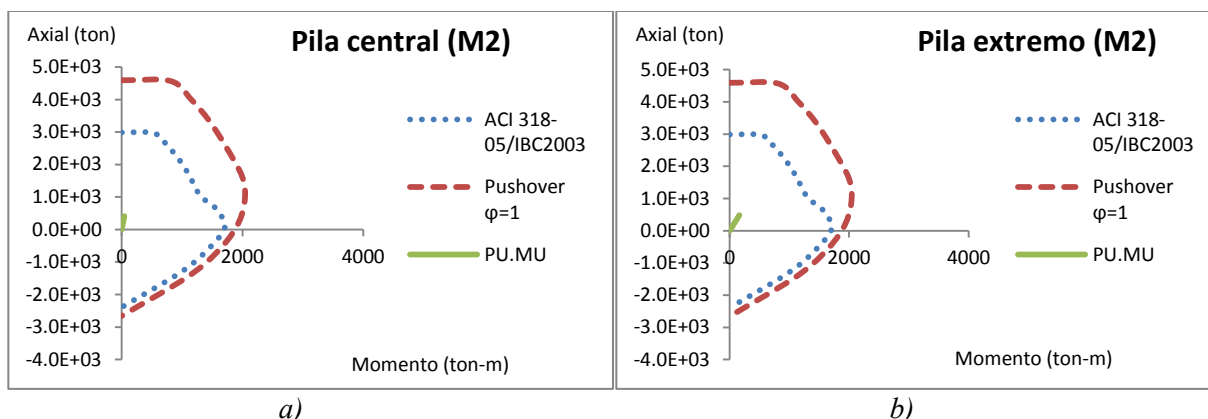


Figura.B.3.27 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M042 y M003 para: a) pila central y b) pila extremo

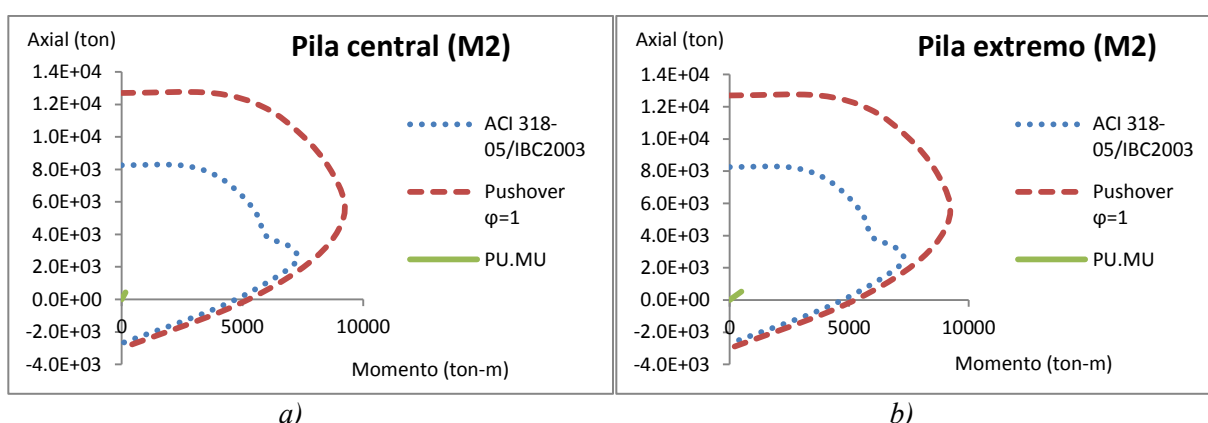


Figura.B.3.28 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M053 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo

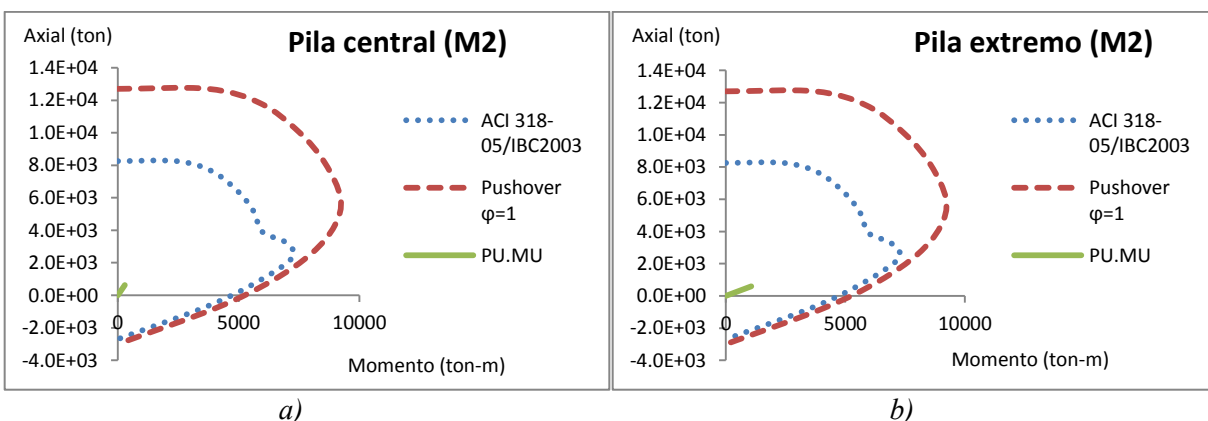


Figura.B.3.29 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M054 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo

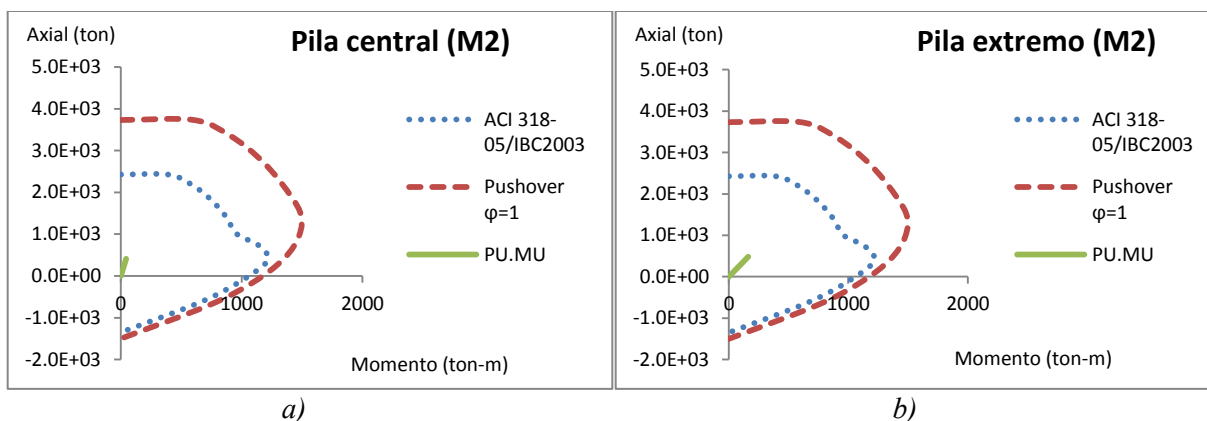


Figura.B.3.30 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M055 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo

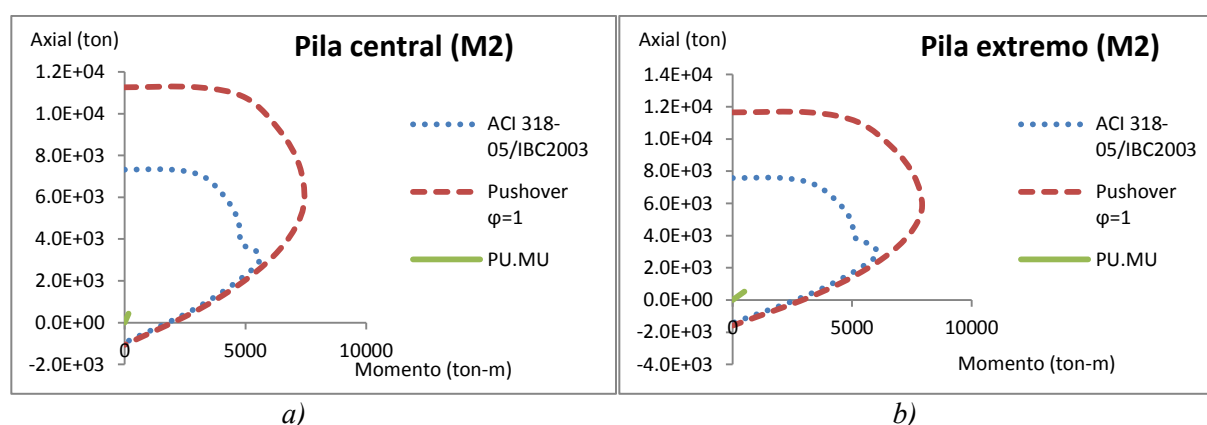


Figura.B.3.31 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M066 y M014 para: a) pila central y b) pila extremo

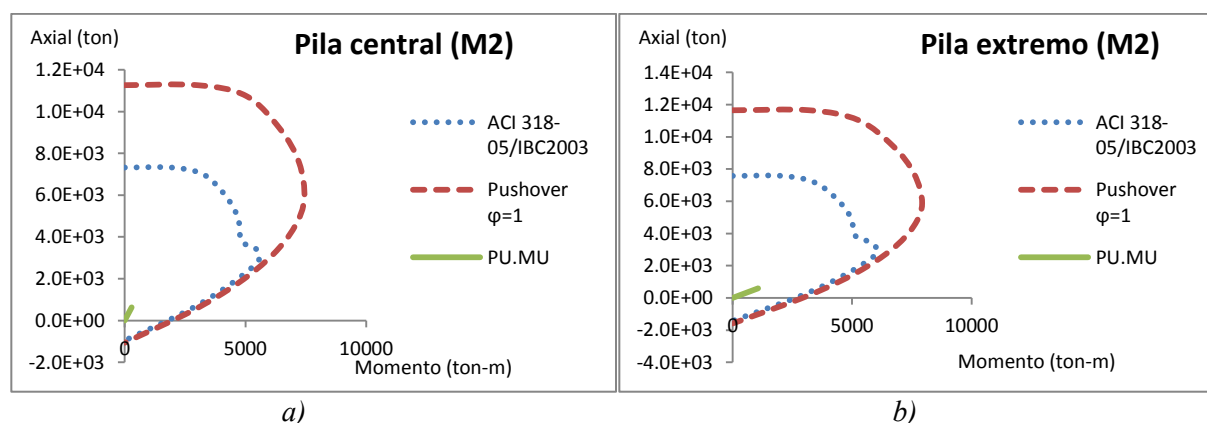


Figura.B.3.32 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M067 y M015 para: a) pila central y b) pila extremo

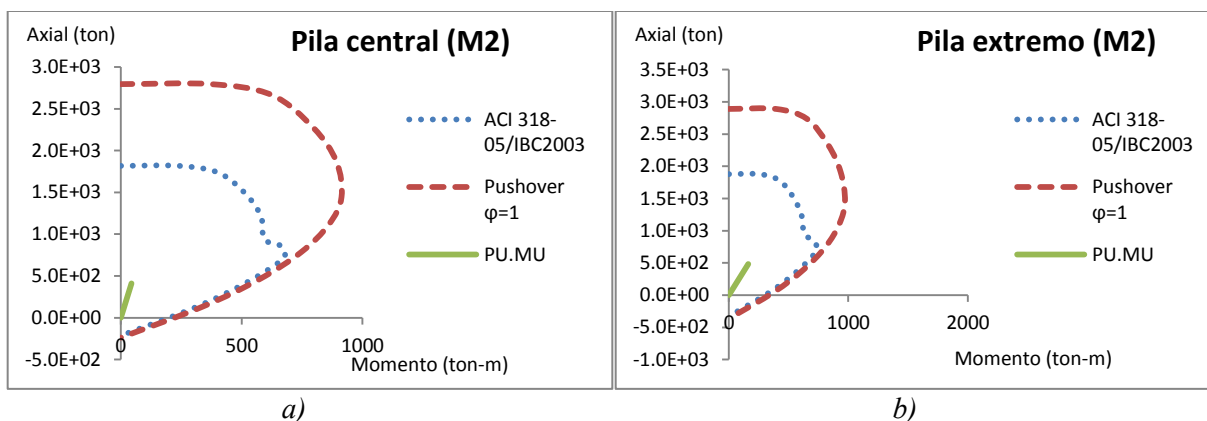


Figura.B.3.33 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M068 y M016 para: a) pila central y b) pila extremo

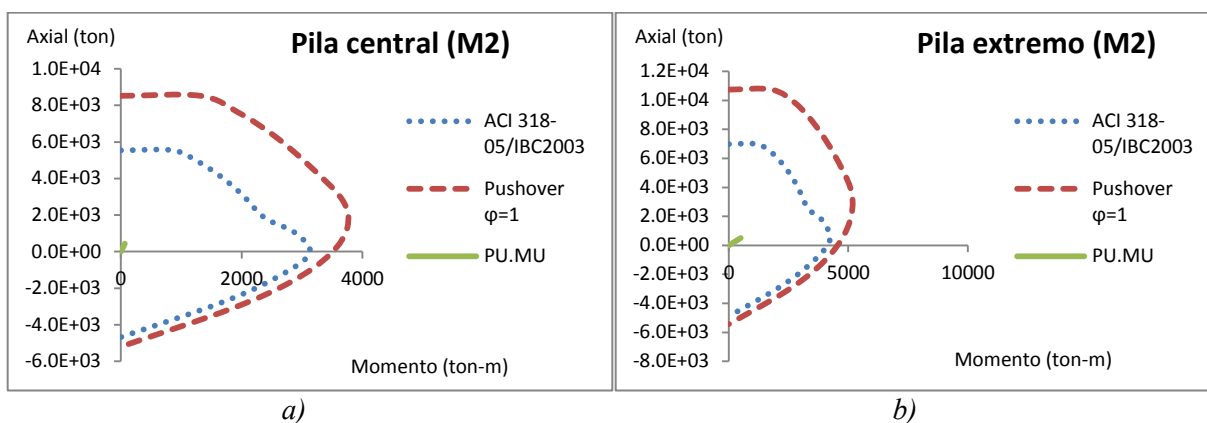


Figura.B.3.34 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M043 y M004 para: a) pila central y b) pila extremo

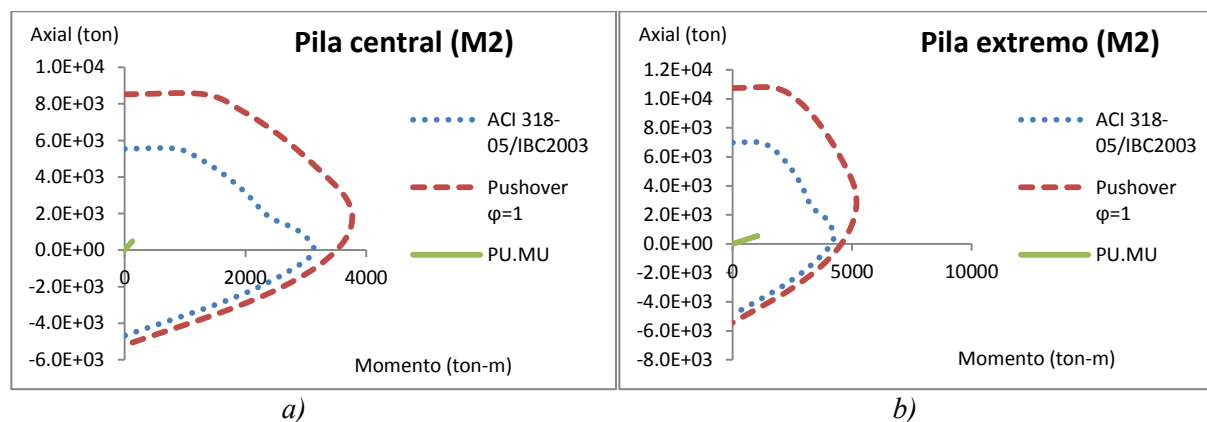


Figura.B.3.35 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M044 y M005 para: a) pila central y b) pila extremo

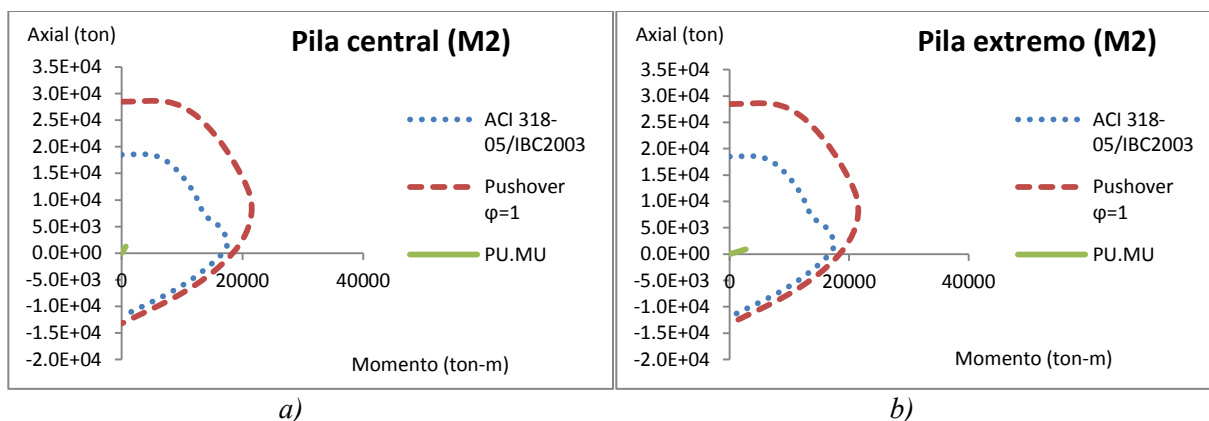


Figura.B.3.36 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M045 y M006 para: a) pila central y b) pila extremo

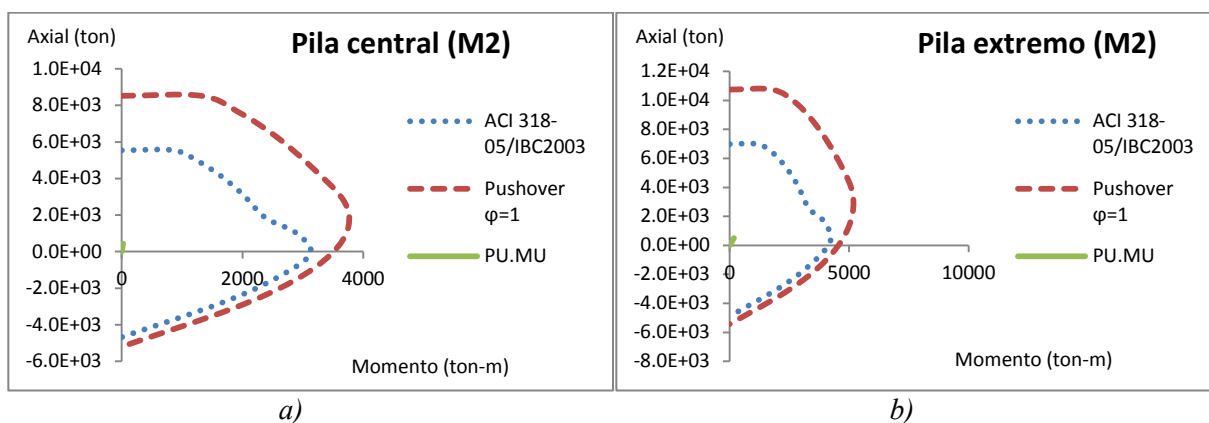


Figura.B.3.37 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M046 y M007 para: a) pila central y b) pila extremo

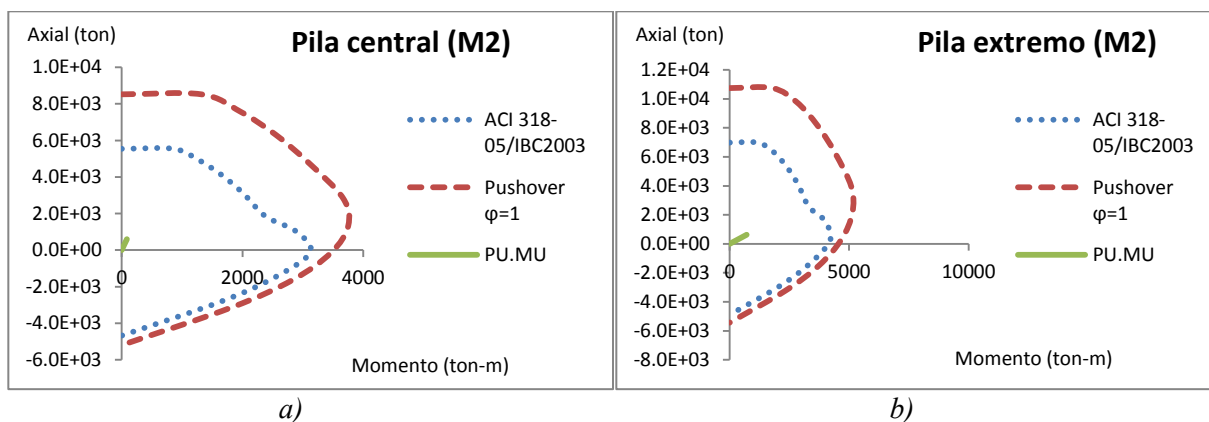


Figura.B.3.38 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M047 y M008 para: a) pila central y b) pila extremo

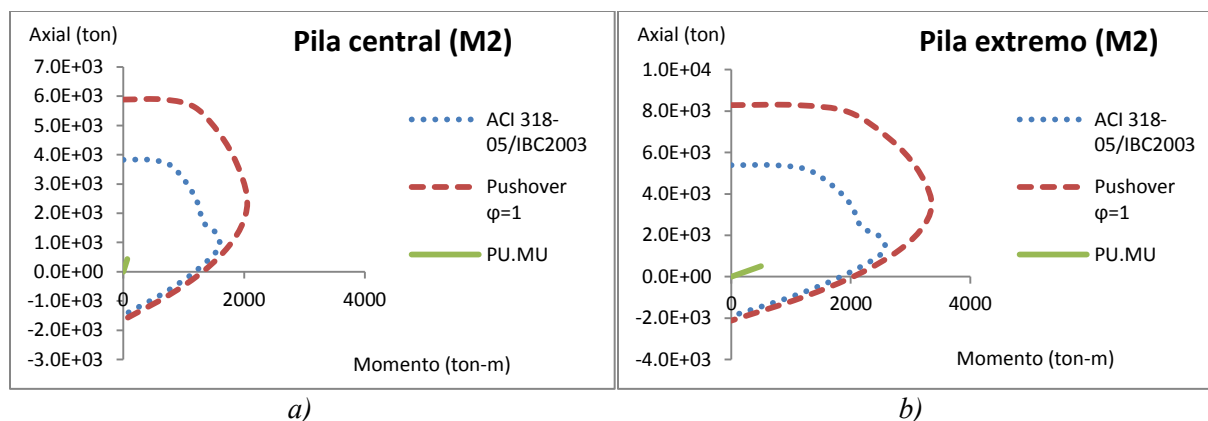


Figura.B.3.39 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M056 y M017 para: a) pila central y b) pila extremo

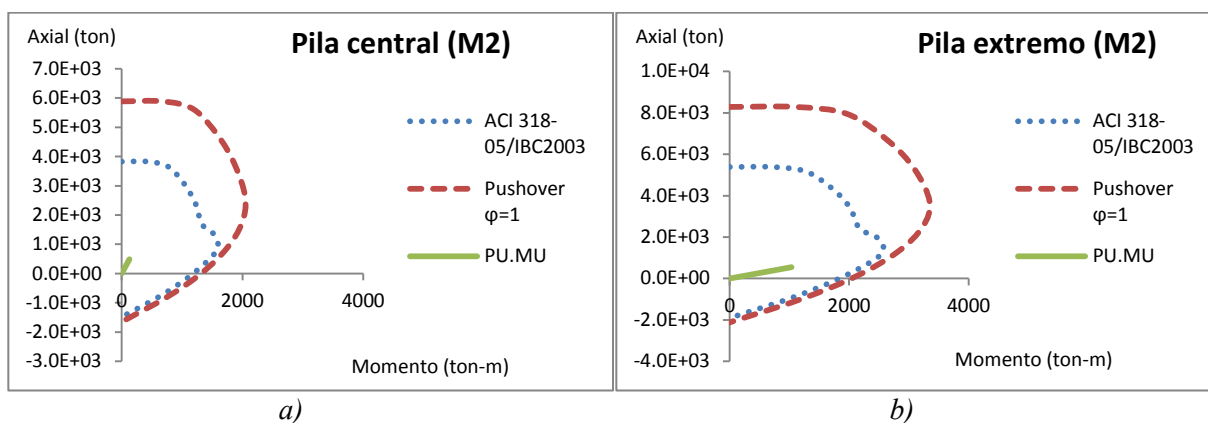


Figura.B.3.40 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M057 y M018 para: a) pila central y b) pila extremo

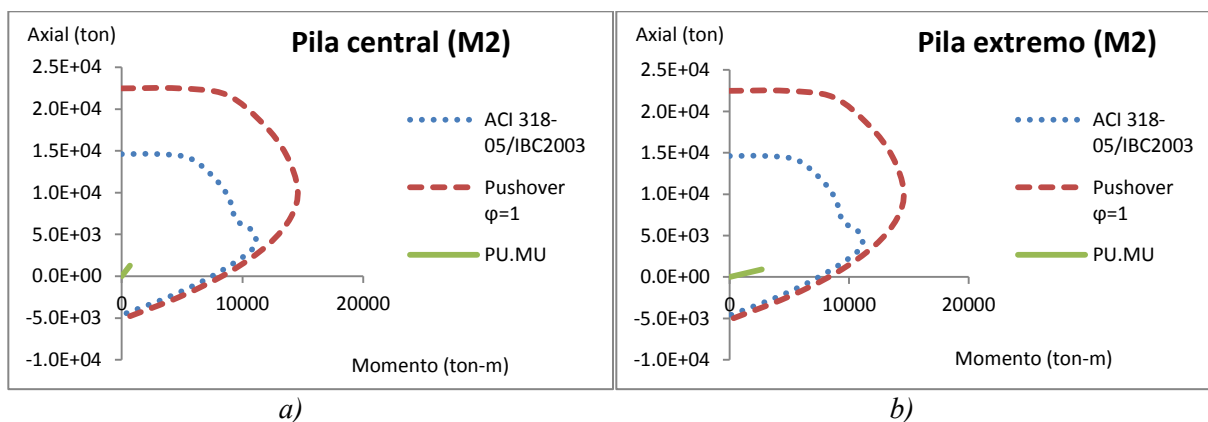


Figura.B.3.41 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M058 y M019 para: a) pila central y b) pila extremo

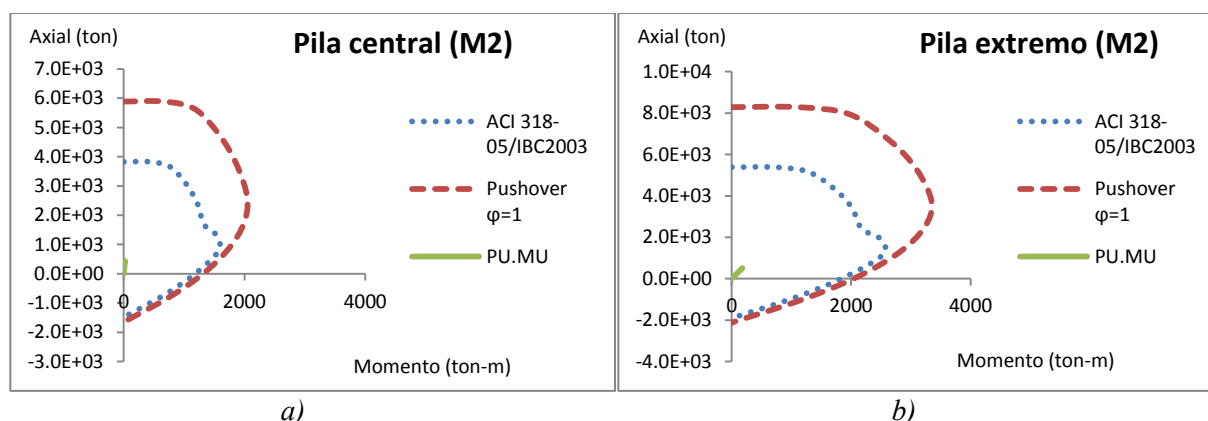


Figura.B.3.42 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M059 y M020 para: a) pila central y b) pila extremo

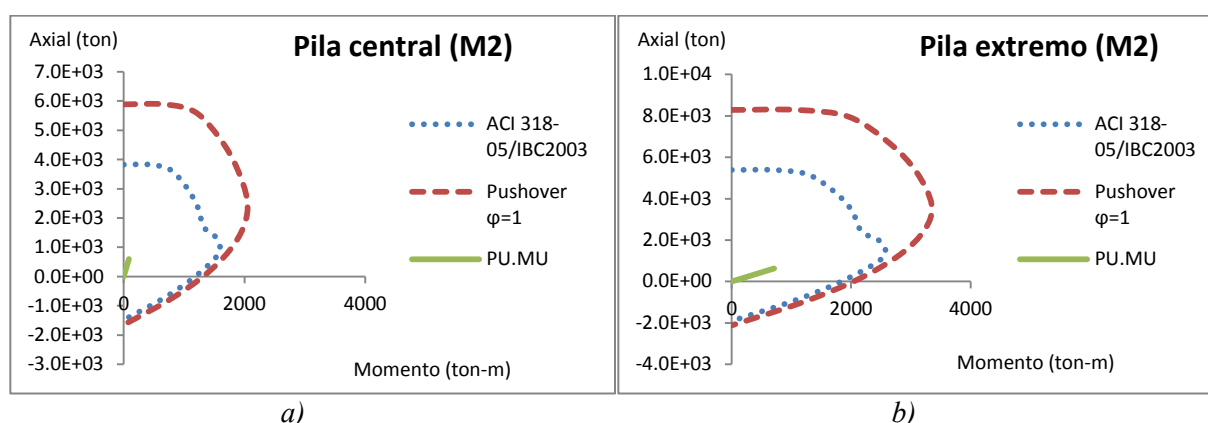


Figura.B.3.43 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M060 y M021 para: a) pila central y b) pila extremo

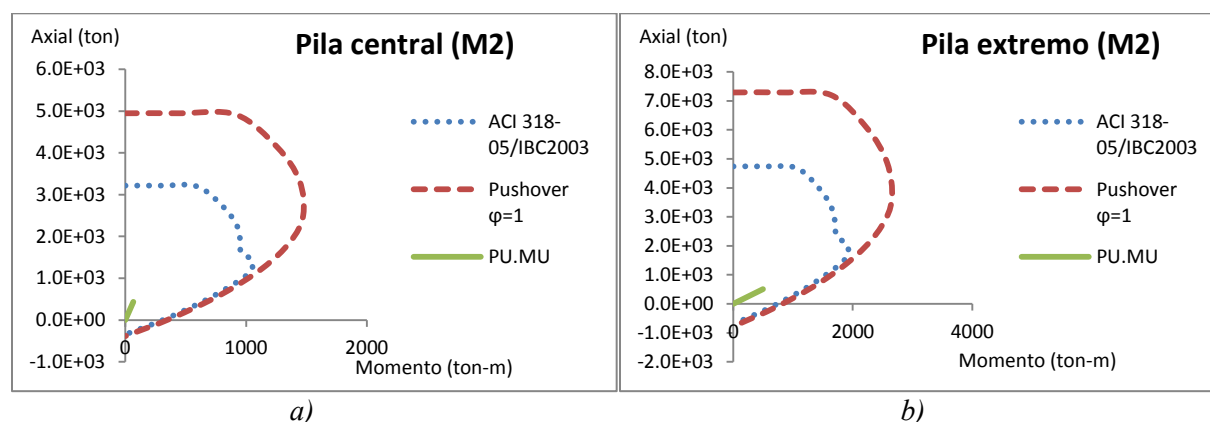


Figura.B.3.44 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M069 y M030 para: a) pila central y b) pila extremo

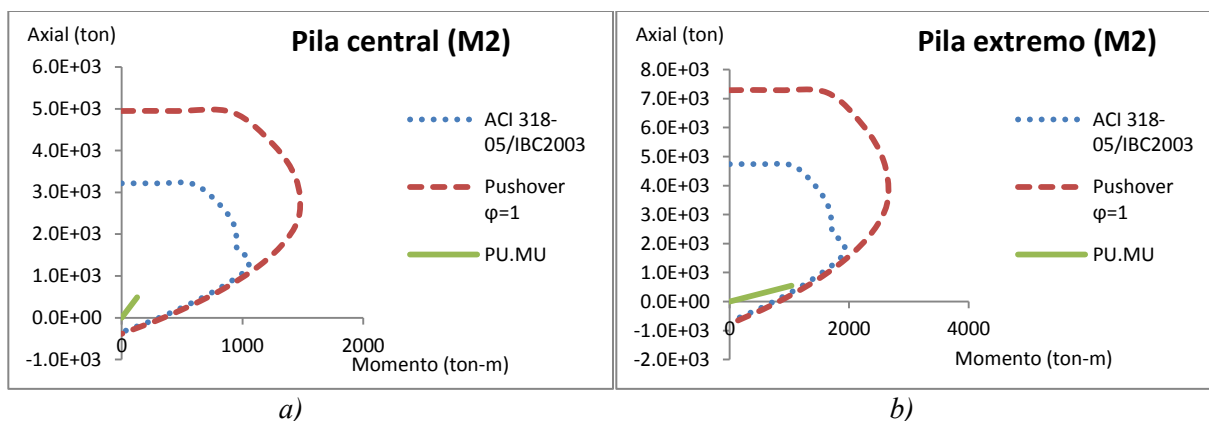


Figura.B.3.45 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M070 y M031 para: a) pila central y b) pila extremo

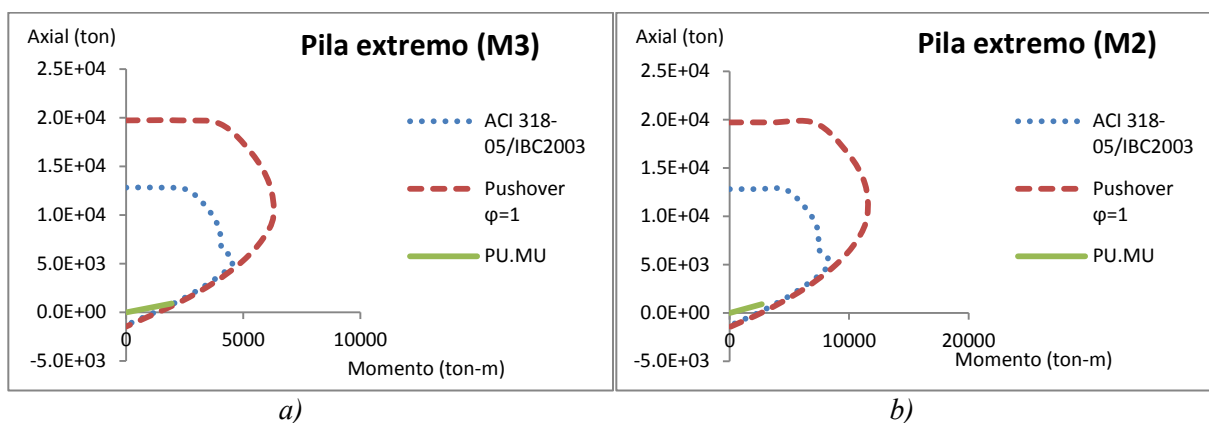


Figura.B.3.46 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M071 y M032 para: a) pila central y b) pila extremo

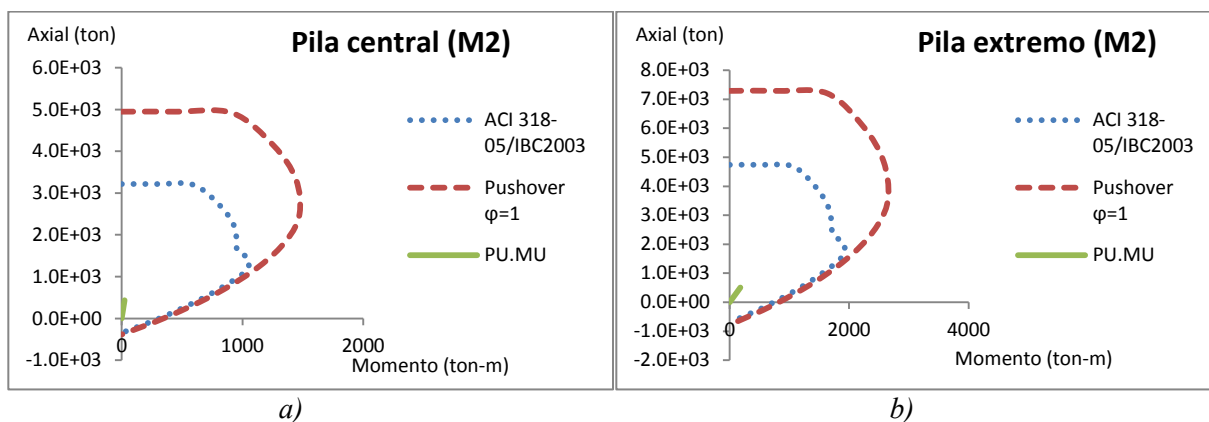


Figura.B.3.47 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M072 y M033 para: a) pila central y b) pila extremo

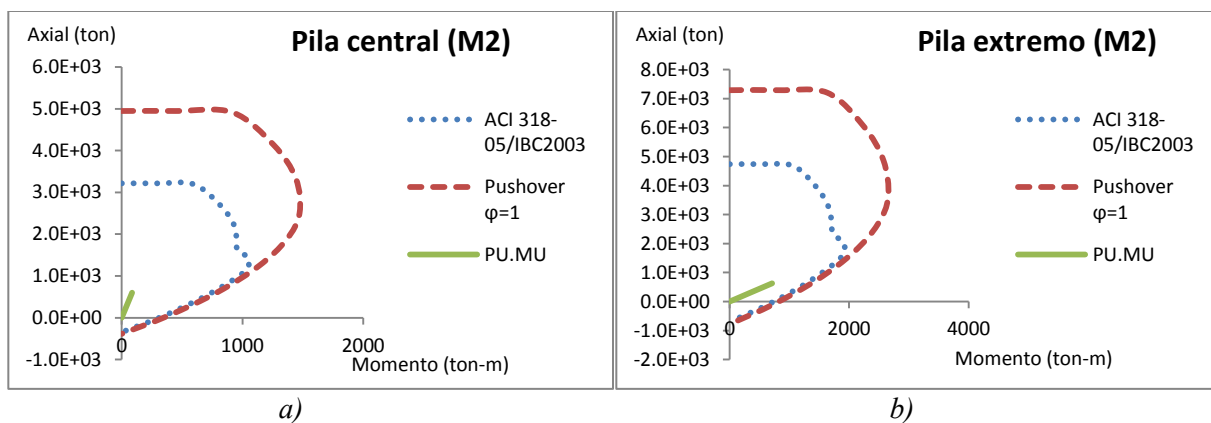


Figura.B.3.48 Diagramas de interacción de las pilas de puente del modelo M073 y M034 para: a) pila central y b) pila extremo

APÉNDICE C. GRÁFICAS DE LAS DUCTILIDADES OBTENIDAS

C.1 Introducción

Por medio de gráficas, de las ductilidades obtenidas, para los múltiples modelos de estudio, se buscó observar la influencia de la ductilidad, en los parámetros propuestos en este trabajo de investigación, por lo que en el apéndice c, se muestran gráficamente, las ductilidades obtenidas de los modelos a los que se les realizó un análisis estático no lineal, con propiedades y características similares, en ambas direcciones de análisis, únicamente para un nivel de desempeño de seguridad de vida.

C.2 Gráficas de las ductilidades obtenidas en la dirección longitudinal de análisis

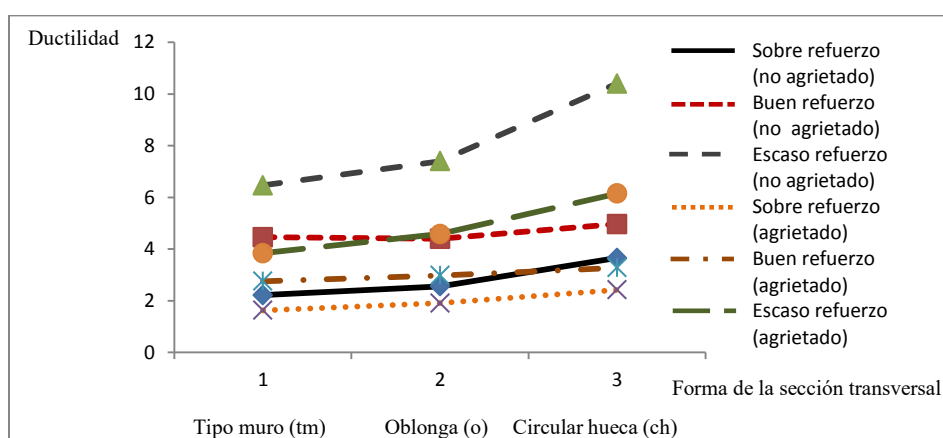


Figura C.2.1. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5 m de altura y pila central con 10 m), buen confinamiento transversal y pilas únicas por eje.

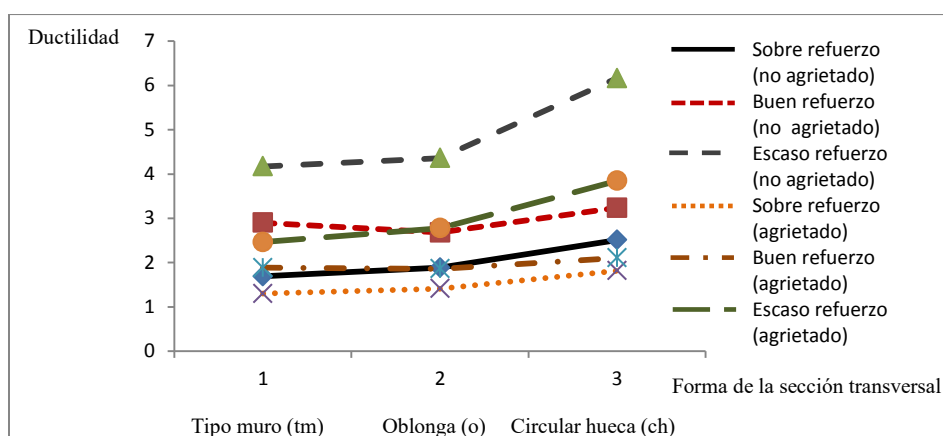


Figura C.2.2. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10 m y pila central con 20 m), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

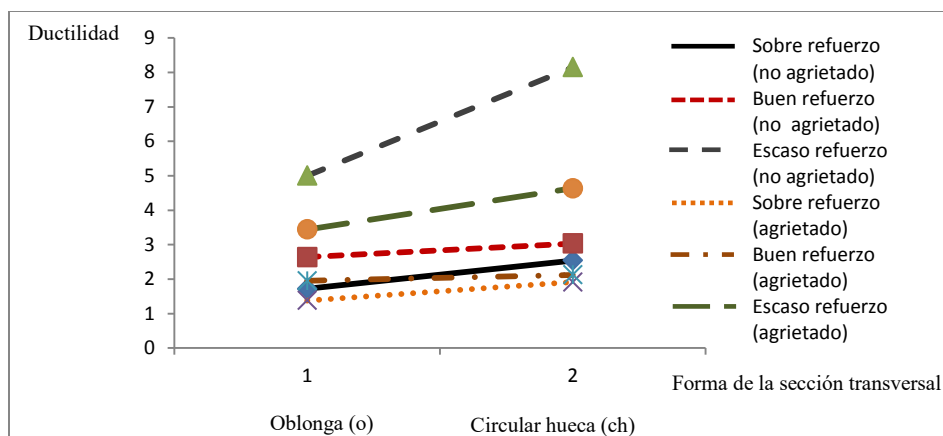


Figura C.2.3. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

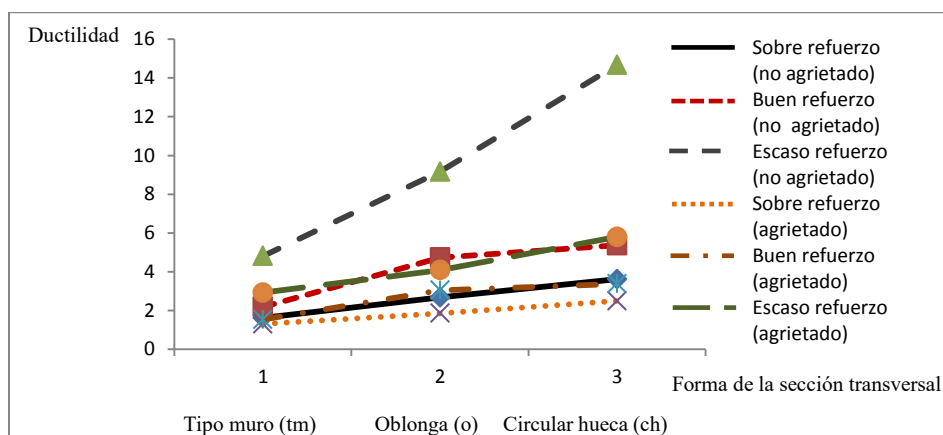


Figura C.2.4. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

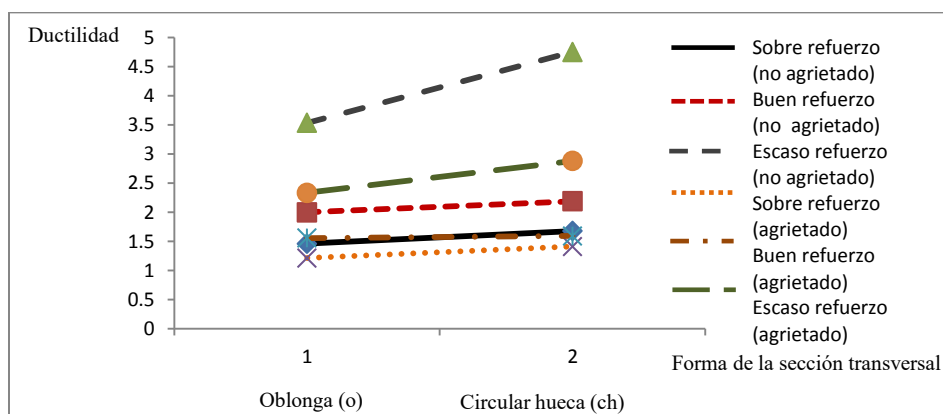


Figura C.2.5. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

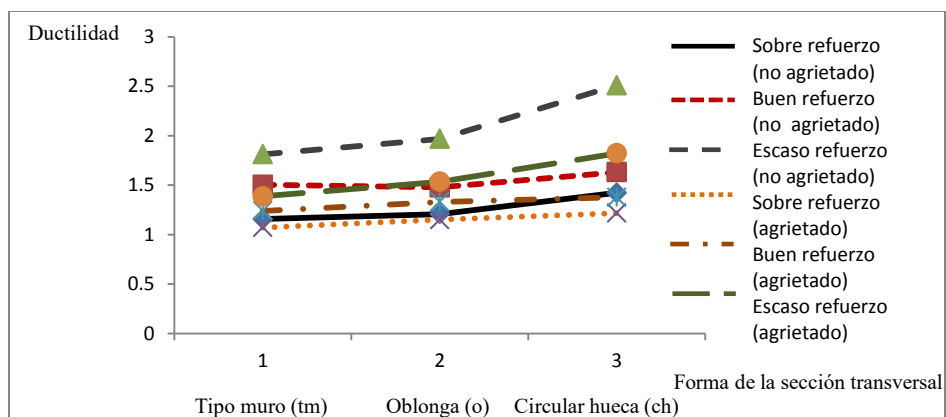


Figura C.2.6. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

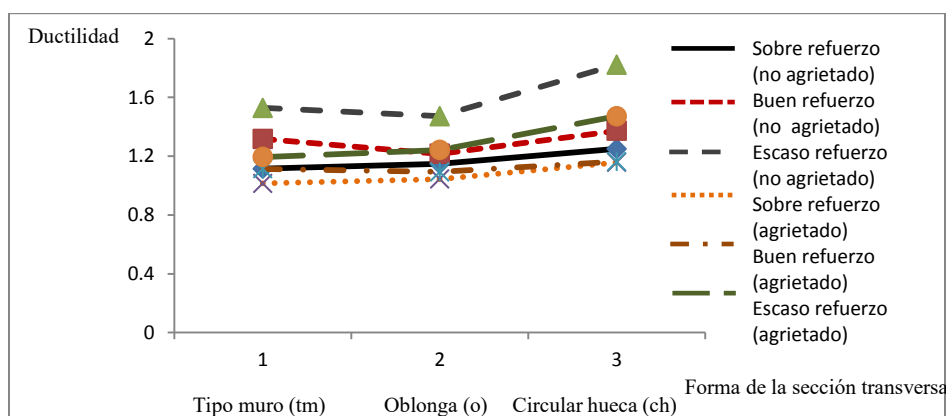


Figura C.2.7. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

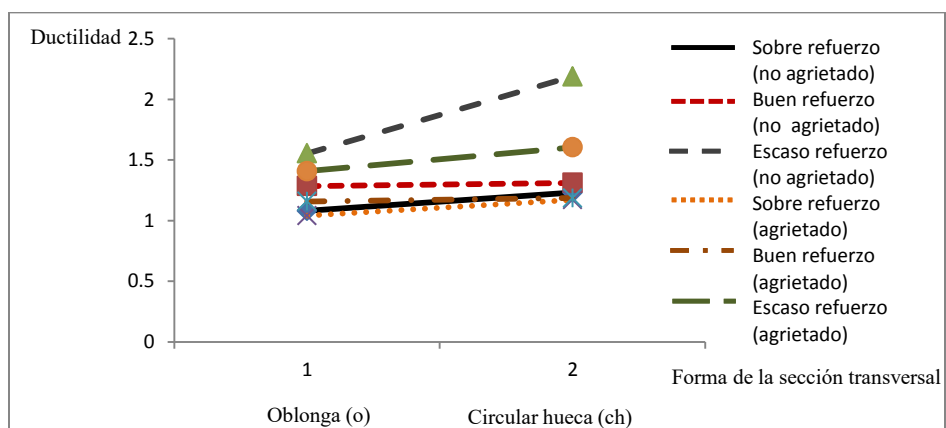


Figura C.2.8. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

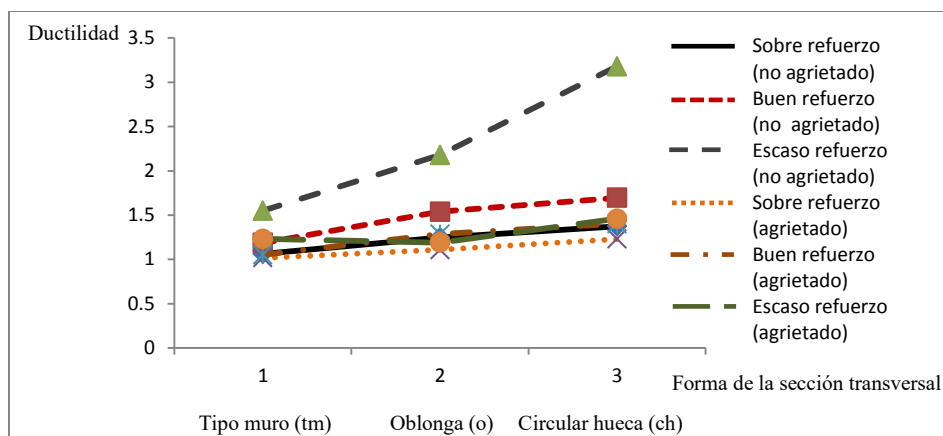


Figura C.2.9. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

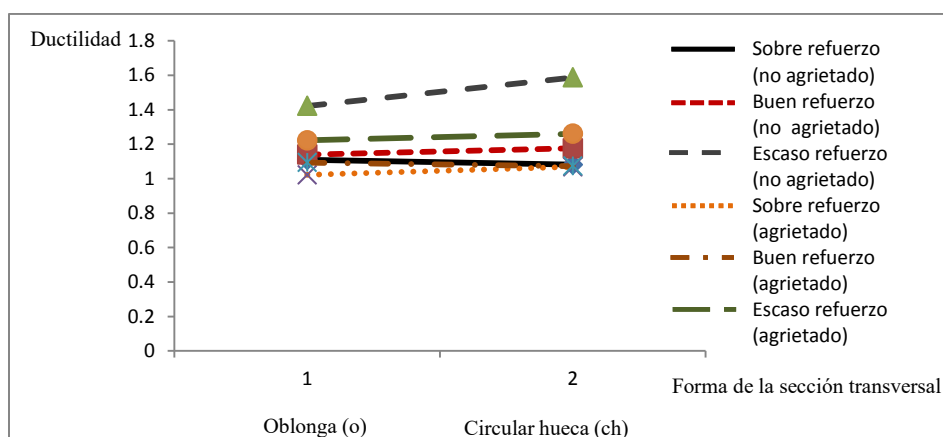


Figura C.2.10. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

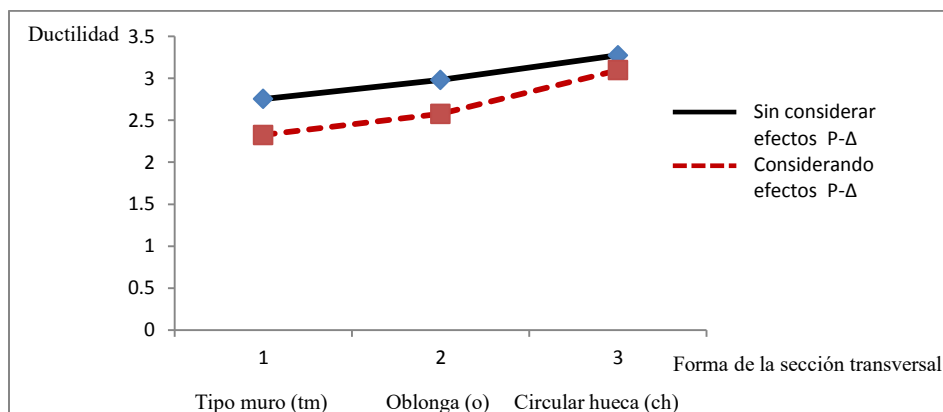


Figura C.2.11. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

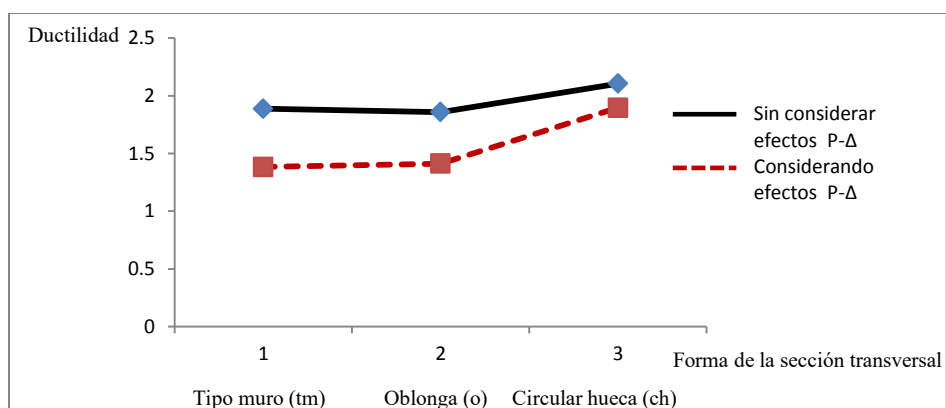


Figura C.2.12. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

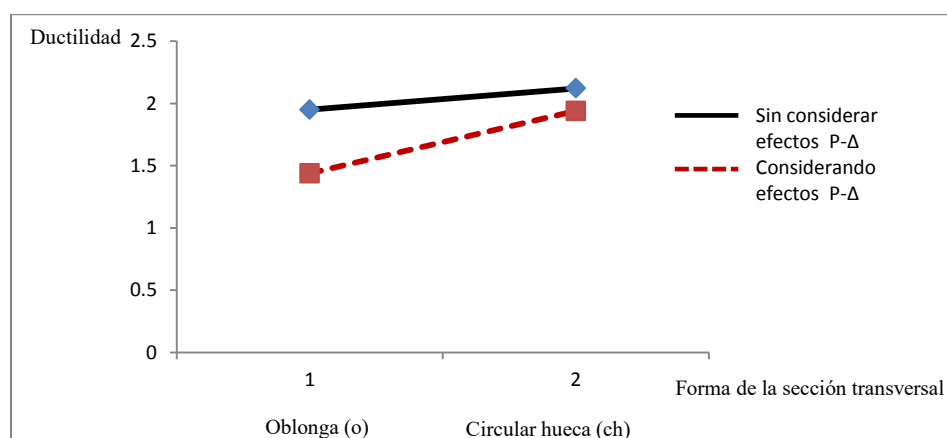


Figura C.2.13. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

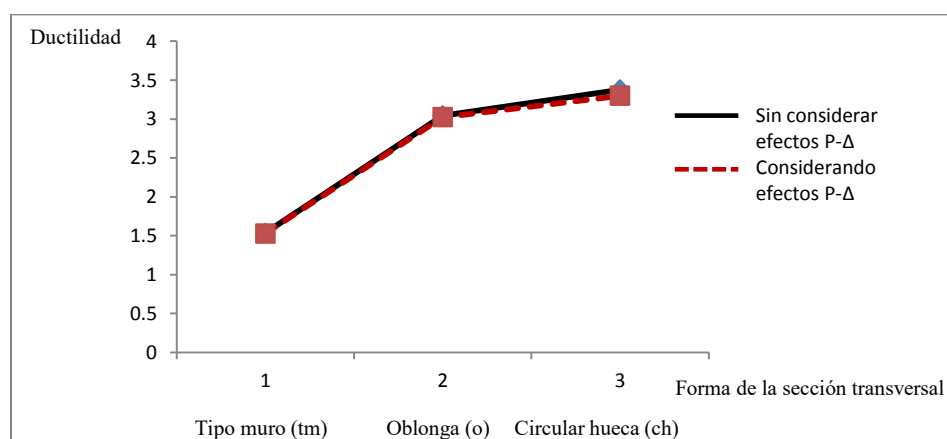


Figura C.2.14. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

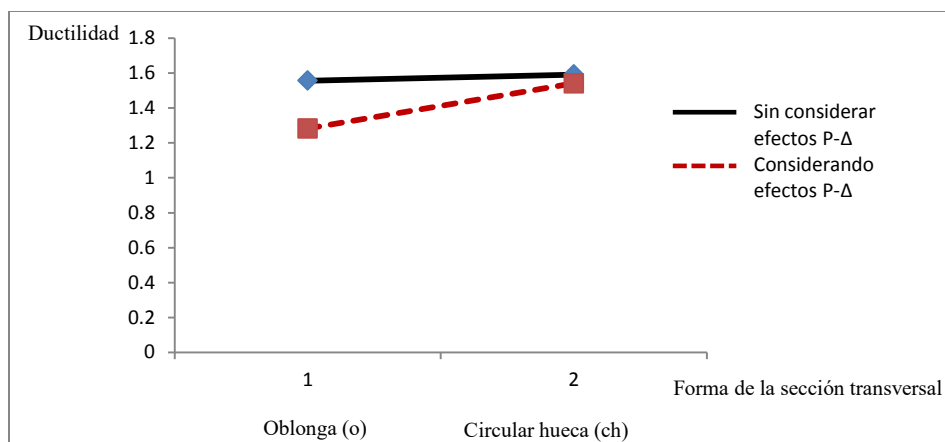


Figura C.2.15. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

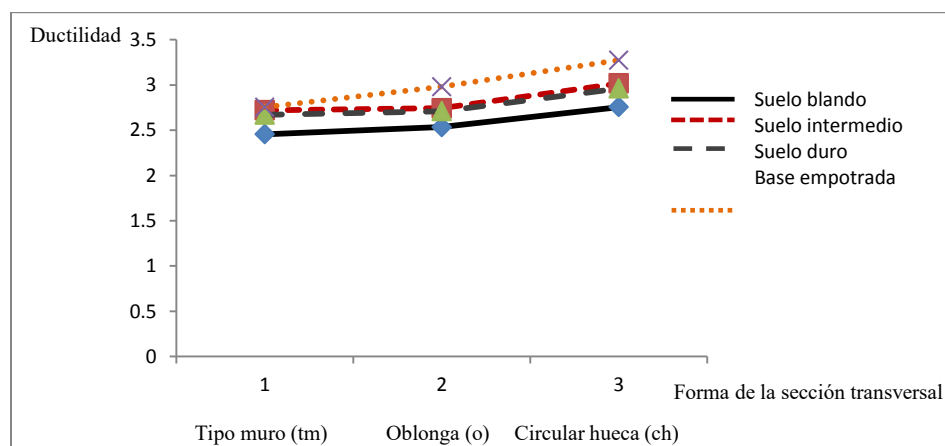


Figura C.2.16. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

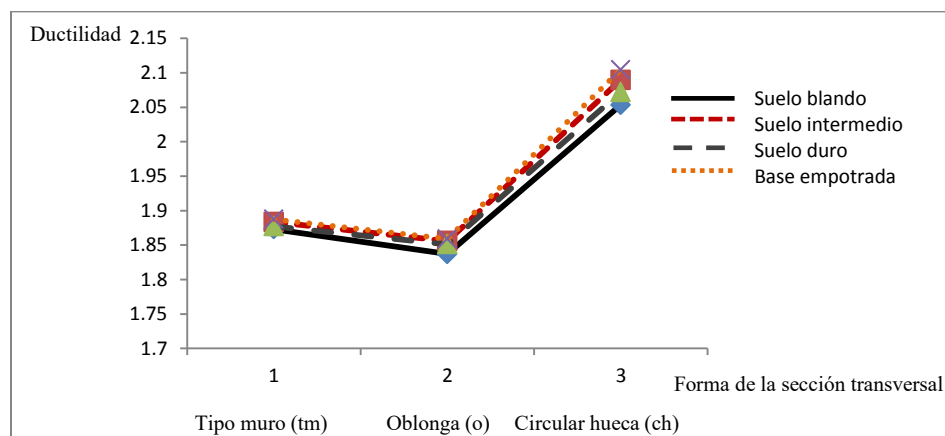


Figura C.2.17. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

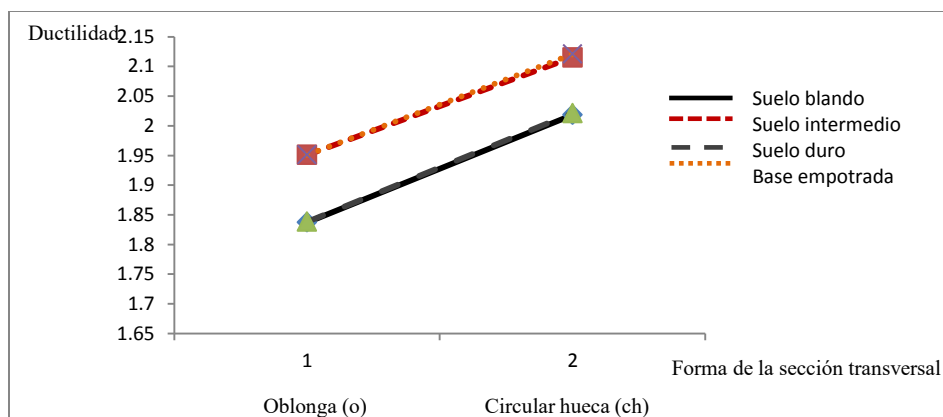


Figura C.2.18. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

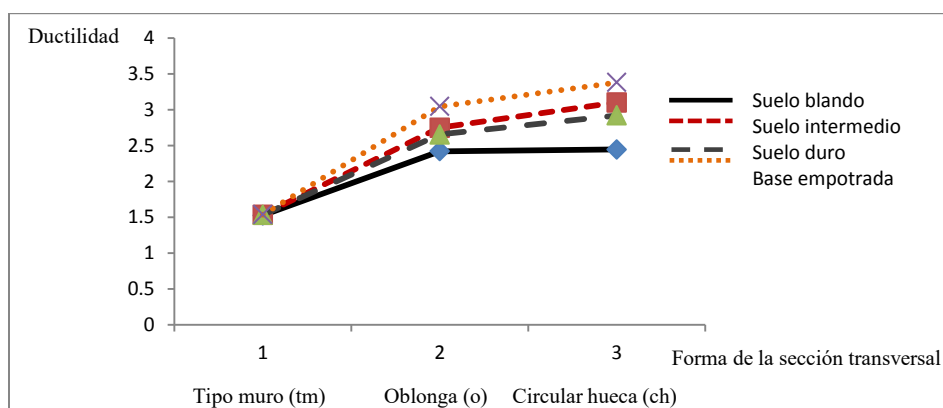


Figura C.2.19. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

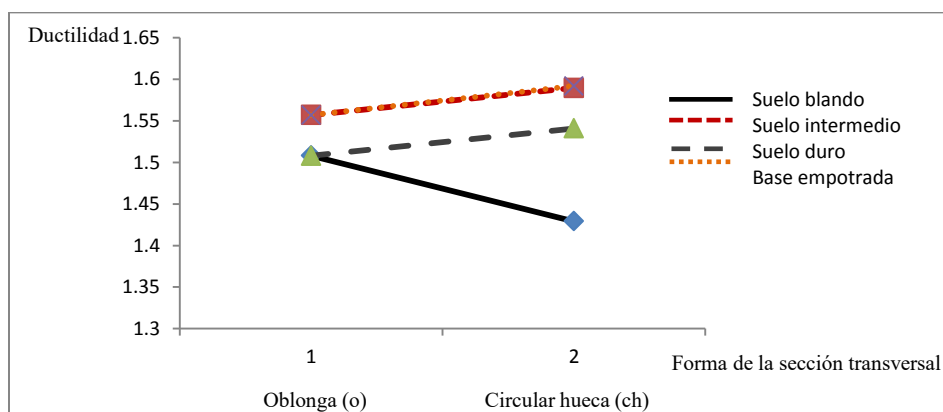


Figura C.2.20. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

C.3 Gráficas de las ductilidades obtenidas en la dirección transversal de análisis

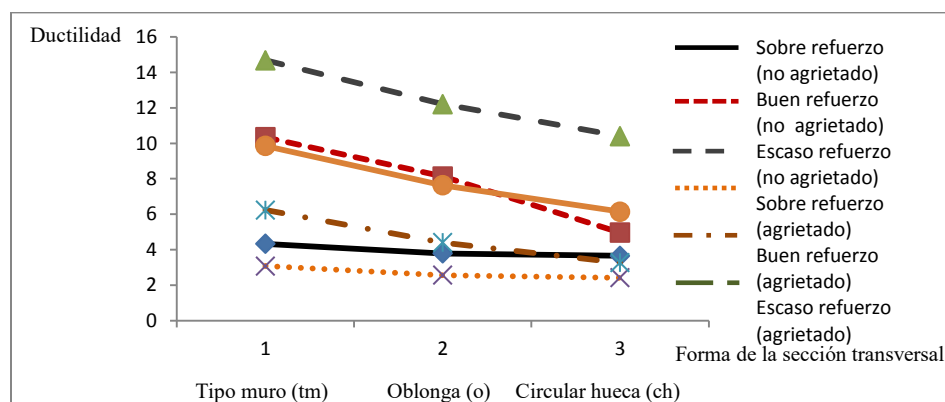


Figura C.3.1. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

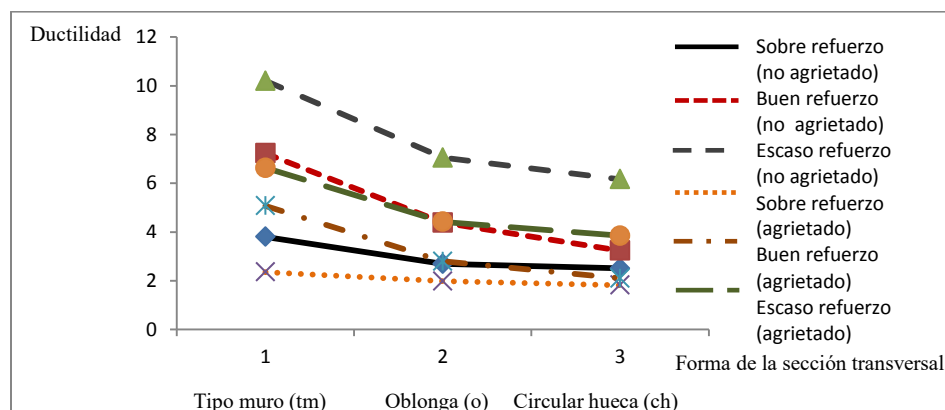


Figura C.3.2. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

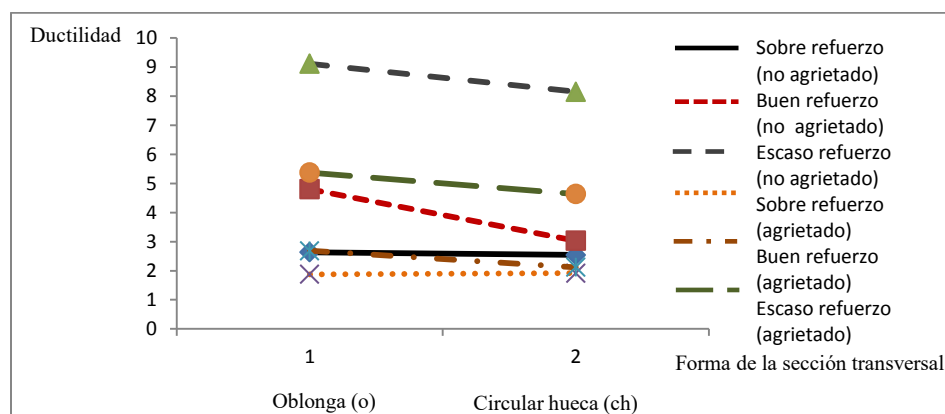


Figura C.3.3. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

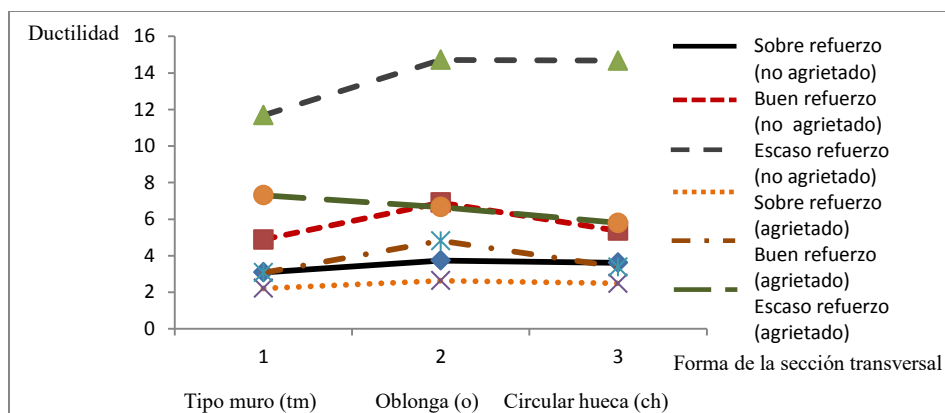


Figura C.3.4. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

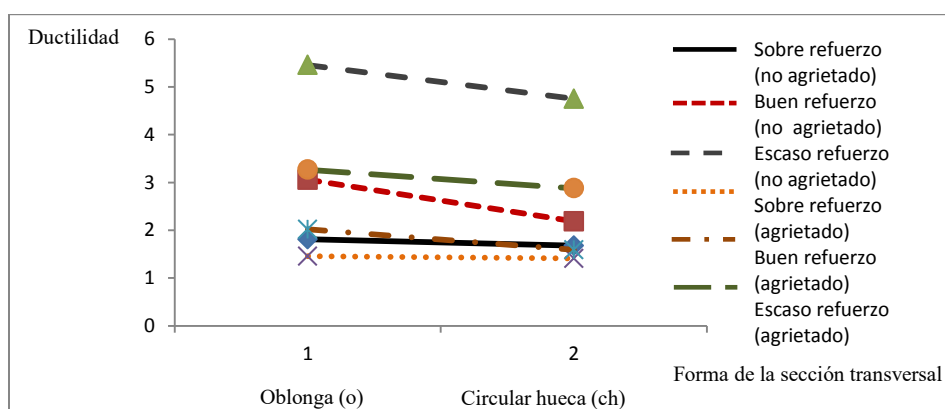


Figura C.3.5. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), buen confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

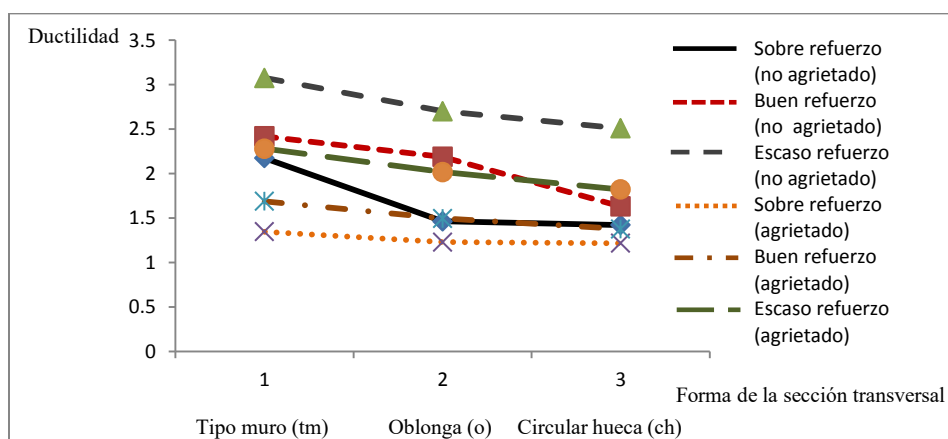


Figura C.3.6. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

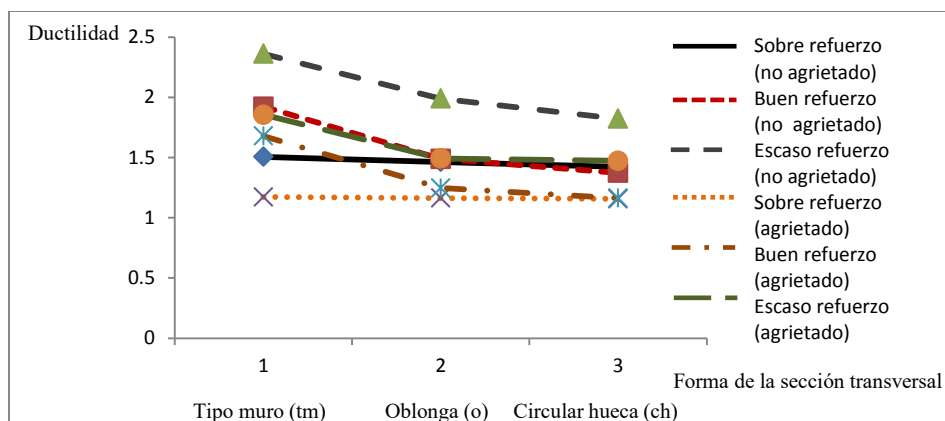


Figura C.3.7. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

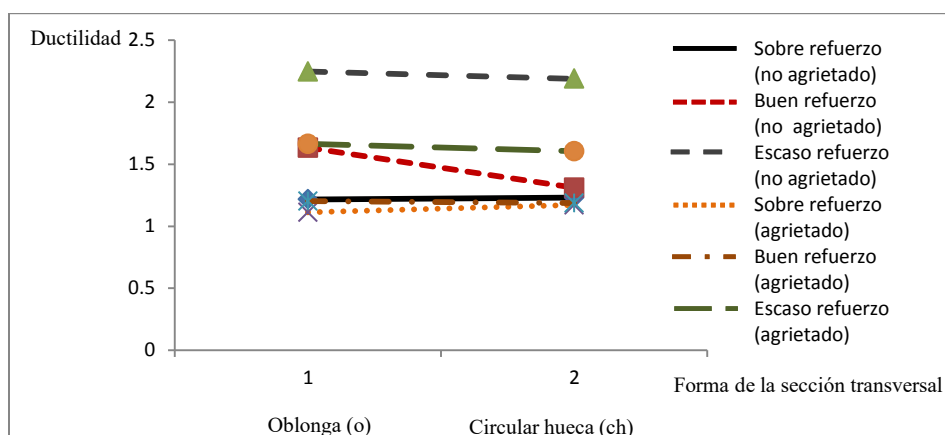


Figura C.3.8. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas únicas por eje.

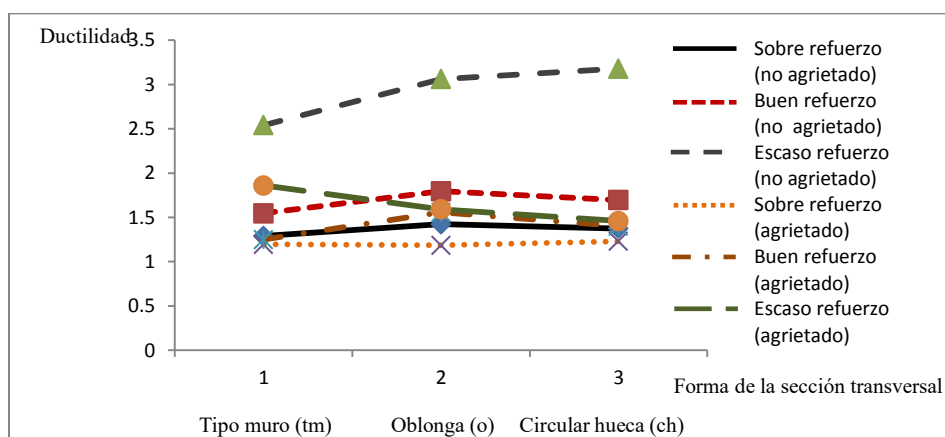


Figura C.3.9. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

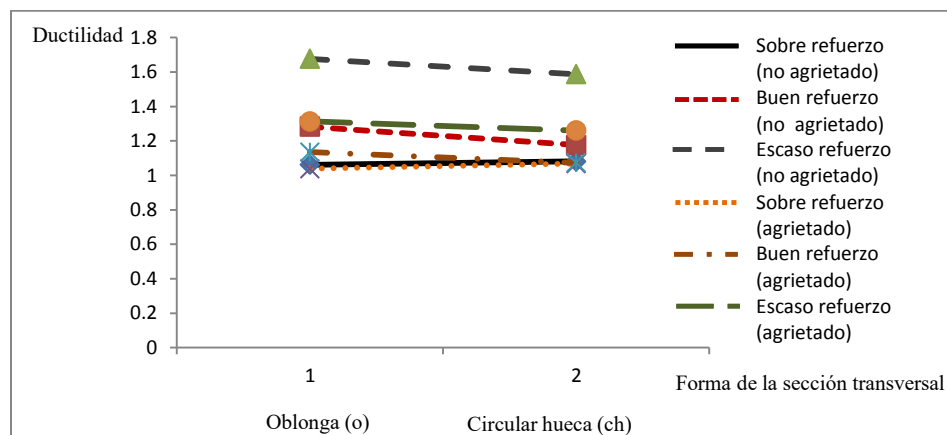


Figura C.3.10. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), mal confinamiento transversal y para pilas múltiples por eje.

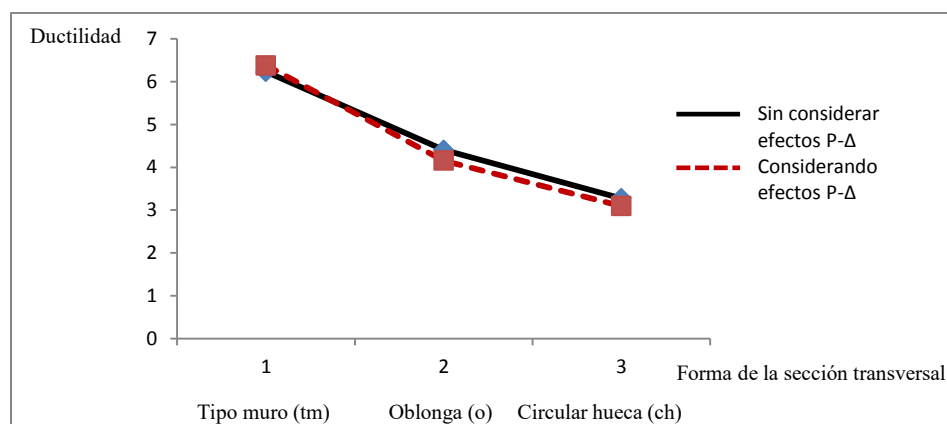


Figura C.3.11. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

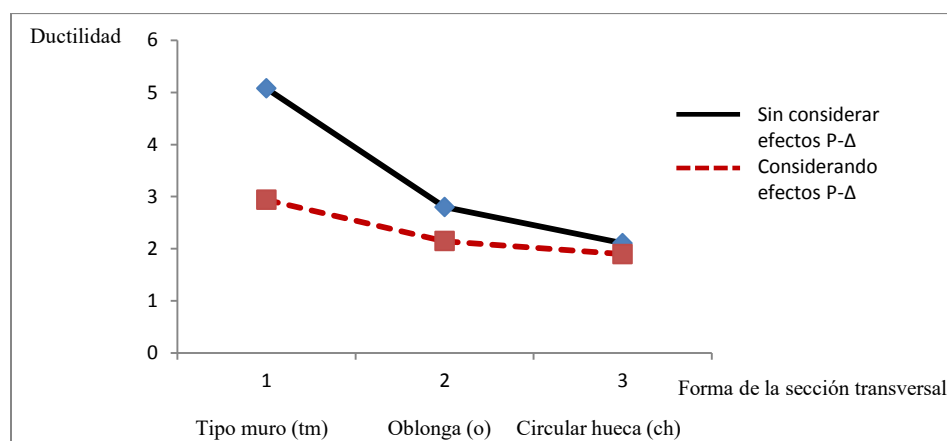


Figura C.3.12. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

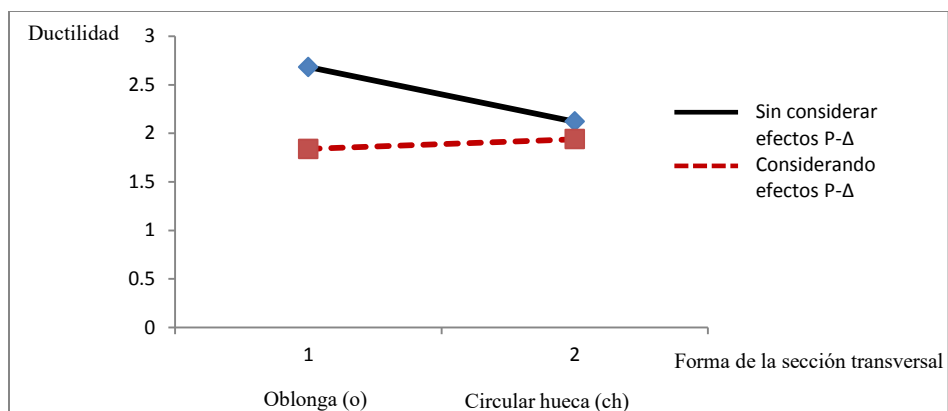


Figura C.3.13. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

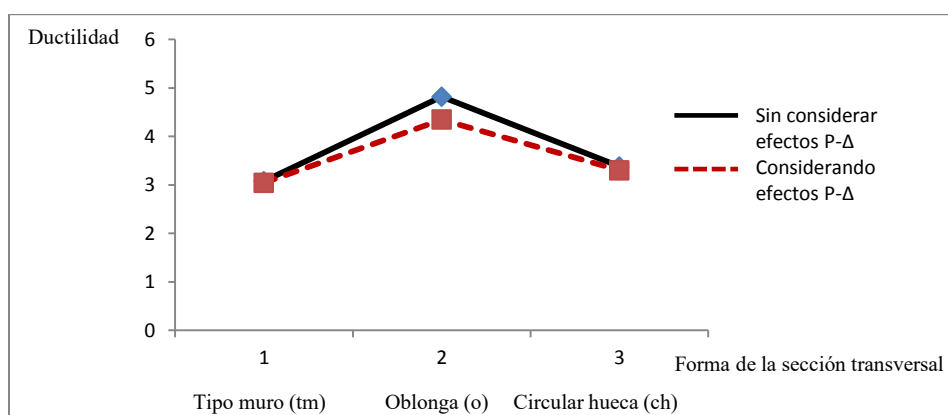


Figura C.3.14. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

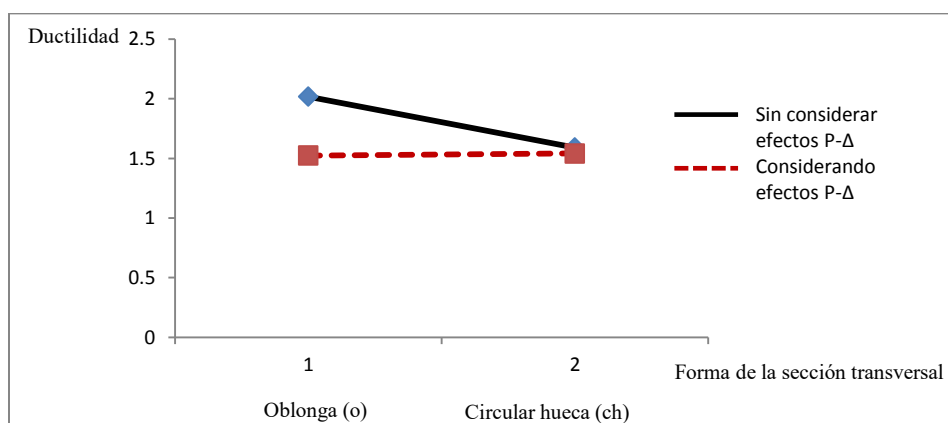


Figura C.3.15. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

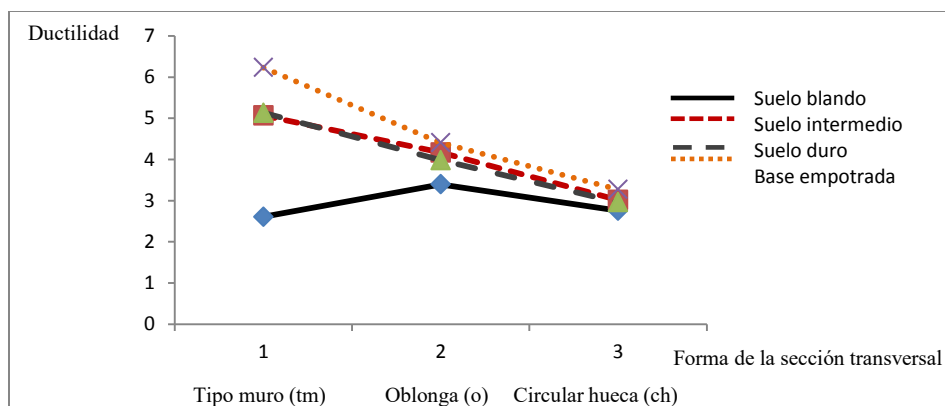


Figura C.3.16. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

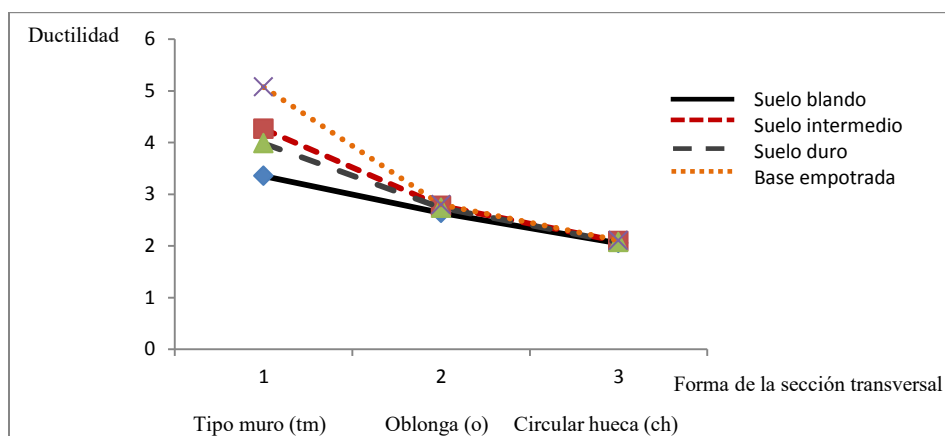


Figura C.3.17. Ductilidades para pilas medias (pilas extremas con 10m de altura y pila central con 20m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

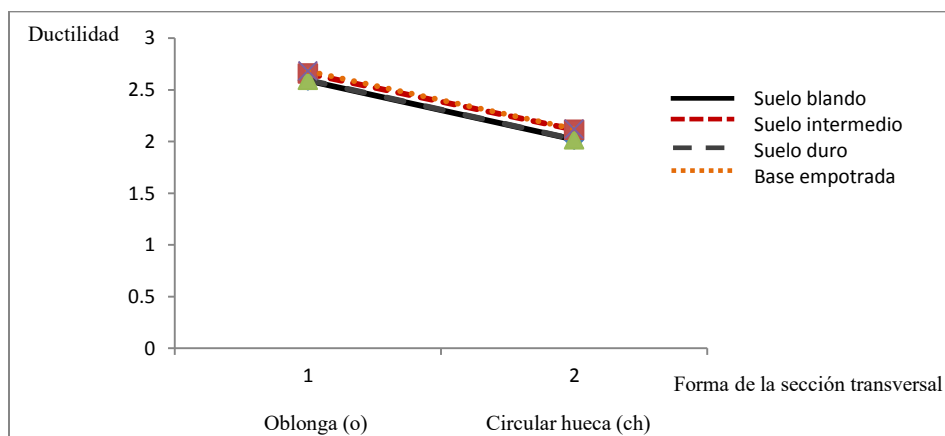


Figura C.3.18. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas únicas por eje.

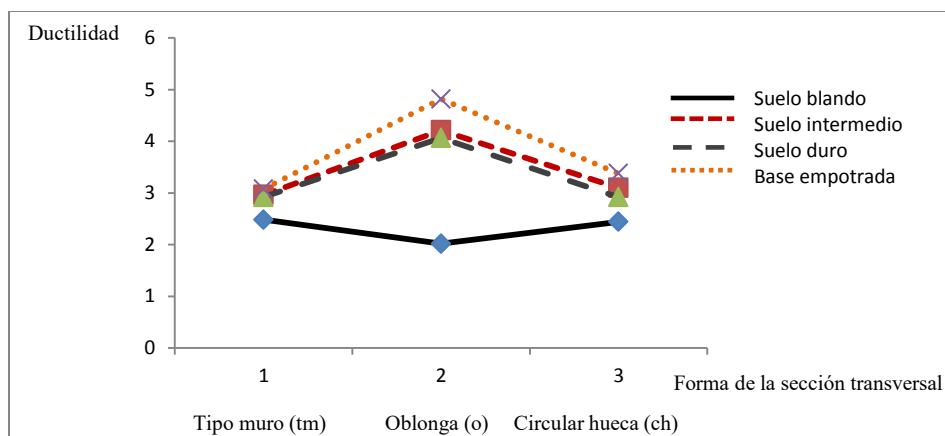


Figura C.3.19. Ductilidades para pilas cortas (pilas extremas con 5m de altura y pila central con 10m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.

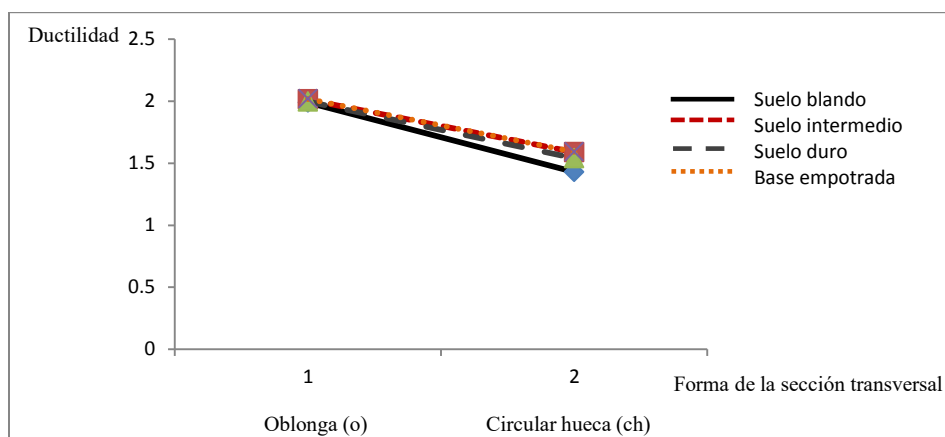


Figura C.3.20. Ductilidades para pilas altas (pilas extremas con 20m de altura y pila central con 40m de altura), con buen refuerzo longitudinal y transversal, para pilas múltiples por eje.